

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO FOTO-FENTON APLICADO AO
EFLUENTE TÊXTIL COM ALTA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS**

Geovana Vendruscolo

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria Eliza Nagel Hassemer

Co-orientadora: Naiara Motim Justino

2014/2



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO FOTO-FENTON APLICADO AO
EFLUENTE TÊXTIL COM ALTA CONCENTRAÇÃO DE
SÓLIDOS**


GEOVANA VENDRUSCOLO

Trabalho submetido à Banca Examinadora como
parte dos requisitos para a Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental-
TCC II.

BANCA EXAMINADORA:


Prof.^a Dr.^a Maria Elisa Nagel Hassemer
(Orientadora)


Dr.^a Cláudia Lavina Martins
(Membro da banca)


Prof. Dr. Pablo Sezerino
(Membro da banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
DEZEMBRO, 2014.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela dádiva da vida e por me conceder a oportunidade de completar mais essa etapa em minha vida.

Agradeço a minha família, pai, mãe e mano, por sempre apoiarem minhas escolhas, em especial a minha mãe, Cenilde, grande incentivadora dos estudos.

Agradeço ao meu amado esposo Tiago, simplesmente meu companheiro de todas as horas, essa conquista também é sua.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina e a todos os Professores com quem tive a honra de ter aula, por me proporcionarem um estudo de qualidade.

Agradeço a querida Professora Maria Eliza pela disponibilidade e paciência para orientar esse trabalho. Agradeço a Naiara pela orientação do trabalho e ajuda, fundamental, nas análises.

Agradeço aos colegas e amigos conquistados durante a graduação, em especial a Bianca, Greice, Jaqueline e Marília por tornarem os momentos de estudo mais prazerosos e divertidos.

Enfim, a todos e todas que de alguma forma influenciaram a minha vida para que este momento em especial pudesse se realizar.

Muito Obrigada!

RESUMO

A indústria têxtil é responsável pela utilização de grandes volumes de água em seus processos industriais, como consequência, um grande volume de efluente é gerado. A presença de cor, devido ao uso de corantes nos processos industriais, é uma característica desse tipo de efluente. Neste cenário surgem os Processos Oxidativos Avançados (POAs) que conseguem promover a mineralização da matéria orgânica com consequente remoção da cor. O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o processo Foto-Fenton no tratamento de efluente têxtil com alta concentração de sólidos. O efluente têxtil utilizado nos experimentos Foto-Fenton foi coletado na indústria após o tratamento biológico e a pesquisa foi realizada em duas etapas: planejamento fatorial e realização dos experimentos 1 e 2. O experimento 1 aconteceu em um reator com lâmpada de vapor de mercúrio de baixa pressão e o experimento 2 em um reator com lâmpada de vapor de mercúrio de média pressão. O tempo de exposição à radiação UV foi de 120 minutos, realizando coletas em tempos pré-determinados (5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 minutos) para análise da cor. Os parâmetros analisados foram: pH, COR, COTd, H_2O_2 , Ferro, Alcalinidade, ST, SDT e SST. A remoção de cor foi de 21% e 50% no experimento 1 e 2 respectivamente. A remoção de COTd foi de 62% no experimento 1 e 75% no experimento 2. O efluente tratado se manteve fora dos padrões exigidos pelo setor têxtil para que seja possível seu reúso nos processos de produção, refrigeração ou geração de vapor.

Palavras-Chave: Processos Oxidativos Avançados, reagente Fenton, efluente têxtil.

ABSTRACT

The textile industry is responsible for the use of large volumes of water in industrial processes, as a result, a large amount of wastewater is generated. The presence of color, due to the use of dyes in industrial processes, is a characteristic of this type of effluent. In this scenario arise Advanced Oxidation Processes (AOP) that can promote mineralization of the organic material with consequent color removal. This work has as main objective to evaluate the photo-Fenton process in the treatment of textile wastewater with high concentration of solids. The textile effluent used in the experiments photo-Fenton was collected in the industry after biological treatment and the research was conducted in two stages: experimental design and execution of experiments 1 and 2. Experiment 1 was in a reactor with a mercury vapor lamp low pressure and the experiment 2 in a reactor with medium pressure mercury vapor lamp. The UV exposure time was 120 minutes, holding samples at predetermined times (5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 minutes) for analysis of color. The parameters analyzed were: pH, Color, COTd, H_2O_2 , Iron, Alkalinity, ST, SDT and SST. The color removal was 21% and 50 % in experiment 1 and 2 respectively. Removing COTd was 62 % in experiment 1 and 75 % in experiment 2. The treated effluent remained outside the standards required by the textile sector to be able to reuse your production processes, cooling or steam generation.

Keywords: Advanced Oxidation Processes, Fenton reagent, textile effluent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de uma estação de tratamento de efluentes utilizando lodo ativado. Fonte: METCALF & EDDY <i>apud</i> KUNZ <i>et al</i> (2002)...	21
Figura 2. Reator STERILIGHT modelo SSM-24.....	36
Figura 3. Sistema utilizado: reator fotoquímico e aparelho para recirculação de água para a refrigeração.	37
Figura 4. Lâmpada de vapor de mercúrio de média pressão.	37
Figura 5. Estrutura molecular dos corantes.	39
Figura 6. Resultados da análise de remoção de cor.....	45
Figura 7. Efluente têxtil utilizado nos experimentos e efluente final do experimento 2.....	46
Figura 8. Valores da medida do parâmetro COTd.	47
Figura 9. pH do efluente final dos experimentos 1 e 2.....	48
Figura 10. Resultados das análises de ST, SST e SDT para o efluente têxtil e para o efluente final dos experimentos 1 e 2.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características dos processos de separação por membranas.	24
Tabela 2. Potencial redox dos principais oxidantes.....	25
Tabela 3. Sistemas típicos de POA.	27
Tabela 4. Requisitos de qualidade de água para uso na indústria têxtil.	34
Tabela 5. Reagentes utilizados.	38
Tabela 6. Valores dos níveis das variáveis.	40
Tabela 7. Planejamento fatorial 2 ³ com ponto central para a otimização do processo Foto-Fenton na degradação do efluente têxtil com resposta em porcentagem de descoloração em tempo de seis minutos de exposição à radiação UV.....	43
Tabela 8. Parâmetros do efluente do sistema lodos ativados (após o reator) utilizado nos experimentos.	44
Tabela 9. Concentrações de ferro total e ferroso nas amostras do efluente final dos experimentos 1 e 2.....	48
Tabela 10. Comparação entre os valores dos parâmetros requeridos para a realização do reúso do efluente nos processos de produção têxtil e os valores dos parâmetros do efluente final dos experimentos realizados.	51
Tabela 11. Padrão de qualidade recomendado para água de resfriamento e geração de vapor.....	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 A Indústria Têxtil.....	13
3.1.1 A Indústria Têxtil no Brasil e em Santa Catarina	13
3.1.2 Processo de Produção	14
3.1.3 Corantes Utilizados na Indústria Têxtil	15
3.1.4 Consumo de água na indústria têxtil.....	17
3.1.5 Efluente gerado.....	18
3.1.6 Principais tratamentos utilizados	19
3.1.7 Remoção de cor	21
3.1.7.1 Remoção da cor por Adsorção.....	22
3.1.7.2 Remoção da cor por Coagulação/Floculação.....	22
3.1.7.3 Remoção da cor por Biodegradação	23
3.1.7.4 Remoção da cor por Tratamento com Ozônio.....	23
3.1.7.5 Remoção da cor por Membranas	23
3.1.7.6 Remoção da cor por POAs	24
3.2 Processos Oxidativos Avançados (POAs)	25
3.2.1 Processo Fenton	27
3.2.2 Processo Foto-Fenton	27
3.2.3 Utilização de complexos de ferro em reações Fenton e Foto-Fenton	29
3.2.4 Fatores que influenciam em processos que empregam reagente Fenton.....	30

3.3 Reúso de efluentes tratados.....	31
4. METODOLOGIA	35
4.1 Efluente têxtil utilizado nos experimentos	35
4.2 Reatores utilizados	35
4.3 Reagentes	37
4.4 Procedimentos experimentais.....	39
4.5 Análises realizadas	41
4.5.1 Peróxido de hidrogênio residual	41
4.5.2 pH.....	42
4.5.3 Cor	42
4.5.4 Carbono Orgânico Total dissolvido (COTd).....	42
4.5.5 Ferro	42
4.5.6 Sólidos Totais (ST), Sólidos em Suspensão Totais (SST) e Sólidos Dissolvidos Totais (SDT).....	42
4.5.7 Alcalinidade	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1 Ensaios preliminares de otimização	43
5.2 Efluente do sistema lodos ativados (após o reator) utilizado nos experimentos	44
5.3 Cor.....	44
5.4 COT dissolvido (COTd).....	46
5.5 pH.....	47
5.6 Ferro Total e Ferro Ferroso	48
5.7 Alcalinidade	49
5.8 Sólidos Totais, Sólidos em Suspensão Totais e Sólidos Dissolvidos Totais	49
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	53
6.1 Conclusão.....	53
6.2 Recomendações.....	53

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
APÊNDICE 1.....	63

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável para a vida. Com o passar das décadas observa-se que a quantidade de água potável disponível encontra-se cada vez mais limitada, em grande parte, devido à contaminação provocada pelas atividades antrópicas. Outro fator a ser considerado é o grande desenvolvimento da indústria química, que ao mesmo tempo em que contribui com melhorias para a vida humana também produz efluentes cada vez mais complexos e de difícil degradação (LUSTOSA, NETO & SILVA, 2013).

Neste cenário destaca-se o setor da indústria têxtil, responsável por 192.100 vagas de empregos formais apenas no estado de Santa Catarina segundo estudo da ABIT (2013), uma vez que ela utiliza a água como meio de transporte dos produtos químicos que entram no processo de produção, por exemplo, os corantes, bem como quando se deseja remover algum tipo de substância do produto fabricado. Uma indústria têxtil pode apresentar diversas conformações de processos produtivos dependendo do produto fabricado e das características aplicadas ao mesmo, o que colabora para a grande diversificação na composição do efluente final que, caso não seja tratado da forma correta, pode provocar grandes danos ambientais.

O efluente têxtil pode apresentar certa dificuldade no tratamento, pois apresenta alto teor de matéria orgânica não biodegradável e muitas vezes o tratamento convencional não apresenta eficiência satisfatória na remoção de tal parâmetro. Por isso, faz-se necessária à pesquisa de novos processos de tratamento que possam ser aplicados a este tipo de efluente. A ideia é que se obtenha um efluente tratado com um nível de qualidade, o qual torne viável seu lançamento nos corpos d'água causando o menor impacto ambiental e que seja passível de reúso (MARTINS, 2011).

Nesse contexto, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) surgem como uma alternativa interessante de tratamento para o efluente têxtil porque promovem a mineralização dos componentes não biodegradáveis gerando dióxido de carbono, água e ânions inorgânicos (TEIXEIRA & JARDIM, 2004).

Diante do exposto acima, a presente pesquisa aplicará um tipo de POA, o processo Foto-Fenton, que consiste em uma reação de degradação do peróxido de hidrogênio catalisada por íons de ferro, em

meio ácido, onde são gerados radicais hidroxilas que possuem alto poder redutor e promovem a degradação dos compostos não biodegradáveis. A fonte de ferro a ser utilizada no processo Foto-Fenton será o complexo de Fe(III) ferrioxalato de potássio (FeOx). A utilização da radiação ultravioleta no processo Foto-Fenton pode aumentar a eficiência de degradação uma vez que contribui para a aceleração da produção de radicais hidroxila.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o processo Foto-Fenton aplicado no tratamento de efluente têxtil com alta concentração de sólidos em duas condições diferentes de radiação UV.

2.2 Objetivos Específicos

- Observar a influência do pH, Ferro e H_2O_2 no processo Foto-Fenton;
- Comparar os resultados obtidos com a aplicação de duas diferentes fontes de radiação ultravioleta no processo Foto-Fenton.
- Avaliar a eficiência do processo Foto-Fenton na remoção de cor e carbono orgânico total dissolvido (COTd) do efluente têxtil;
- Analisar as possibilidades de reúso do efluente tratado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Indústria Têxtil

3.1.1 A Indústria Têxtil no Brasil e em Santa Catarina

O setor têxtil é um dos segmentos de maior tradição dentro no âmbito industrial, contando com uma posição de destaque na economia dos países mais desenvolvidos e carro-chefe do desenvolvimento de muitos dos chamados países emergentes, que devem à indústria têxtil o papel de destaque que exercem no comércio mundial de manufaturas. No Brasil, a sua importância não é menor, tendo desempenhado um papel de grande relevância no processo de desenvolvimento do país (HASSEMER, 2006).

O Brasil possui uma cadeia têxtil completa, pois produz desde as fibras até às confecções. O setor representa cerca de 6% do valor total da produção da indústria de transformação, possui mais de 32 mil empresas e emprega cerca de 1,7 milhões de brasileiros, sendo que 75% são funcionários do segmento de confecção. O país ocupa a quarta posição entre os maiores produtores mundiais de artigos de vestuário e a quinta posição entre os maiores produtores de manufaturas têxteis (ABIT, 2013).

Mesmo sendo um grande produtor e consumidor de têxteis e de vestuário, sua participação no comércio mundial é muito pequena, menos de 0,5%, ocupando a 23ª posição no ranking de exportadores. China e Hong Kong são responsáveis por 36% das exportações mundiais de produtos têxteis e vestuário. Em 2012, o setor têxtil e de confecção brasileiro faturou US\$ 56,7 bilhões, contra US\$ 67 bilhões em 2011, sinal de que vem perdendo competitividade (ABIT, 2013).

Os principais compradores dos produtos brasileiros, os Estados Unidos e a Europa, com os mercados em recessão diminuíram as compras do Brasil e também dos países asiáticos. Nessa conjuntura, os países asiáticos voltaram-se para os países emergentes, como o Brasil, para escoar os excessos de produção, principalmente vestuário. A participação dos vestuários importados, especialmente da Ásia, vem crescendo de forma preocupante, ocupando o lugar dos produtos brasileiros nas grandes e pequenas lojas de varejo. Com isso, o setor possui como desafios para os próximos anos conseguir driblar a entrada dos excedentes produtivos de outros países, os efeitos da inflação sobre o poder aquisitivo das famílias e conseguir a aprovação de um regime

tributário que forneça melhores condições de competitividade ao setor (ABIT, 2013).

No Estado de Santa Catarina a região de destaque é o Vale do Itajaí, considerado um dos pólos têxteis mais avançados da América Latina e o centro brasileiro com maior inserção no mercado internacional, sendo o principal exportador nacional de artigos de malha e linha lar (COSTA & ROCHA, 2009).

Blumenau se destaca como um dos maiores pólos têxteis de malhas e tecidos de cama, mesa e banho sendo considerada a capital do pólo têxtil catarinense, tido como o segundo maior do mundo, com mais de 120 grandes empresas e um total de 339 unidades. Em Brusque se concentra um grande número de indústrias direcionadas para os tecidos planos. Pode-se afirmar que a história da região se confunde com a própria história da indústria têxtil no Brasil (CARREIRA, 2006).

No ano de 2010, Santa Catarina possuía 9.264 indústrias atuando no setor têxtil que empregavam 172,8 mil trabalhadores. A produção do setor no mesmo ano correspondeu a 2,5% das exportações do estado, US\$ 190 milhões. Santa Catarina é o maior fabricante de fios para tricô e crochê do país, é líder na América Latina na produção de fitas elásticas e rígidas e, no comércio internacional, é o maior exportador do país de roupas de toucador/cozinha, de tecidos atoalhados de algodão e de camisetas T-Shirt de malha (FIESC, 2011).

3.1.2 Processo de Produção

A indústria têxtil trabalha com o objetivo de transformar fibras em fios, os fios em tecidos e os tecidos em peças de vestuário, têxteis domésticos (roupa de cama e mesa) ou em artigos para aplicações técnicas (geotêxteis, airbags, cintos de segurança, etc.) (MELO, 2008).

De acordo com Ferreira, Spanhol e Keller (2009), a cadeia de produção têxtil se inicia com a produção das fibras, naturais, sintéticas ou artificiais, utilizadas no processo de fiação que tem o objetivo de transformar a fibra em fio. Os fios, produzidos na fiação, são utilizados como insumo no processo de tecelagem onde ocorre a construção do tecido. Após esses processos, há a necessidade de personalizar o fio ou o tecido produzido adicionando cor ou alguma qualidade ao material.

Essa etapa final de acabamento pode ser chamada de etapa de beneficiamento. Beltrame (2000) descreve que o beneficiamento de um tecido acontece após sua tecelagem e é feito quando se deseja alterar ou adicionar alguma característica ao tecido como, por exemplo, aumentar

a resistência, mudar a aparência, impermeabilizá-lo entre outras. As etapas do beneficiamento podem ser divididas em: pré-tratamento, tinturaria, estamparia e acabamento final.

- Pré-tratamento: o objetivo é eliminar as impurezas do tecido preparando-o para os seguintes processos químicos;
- Tinturaria: Aplicação de corantes para conferir cor ao tecido;
- Estamparia: Aplicação de cores ou desenhos localizados no produto têxtil;
- Acabamento final: Processo que objetiva conferir determinada qualidade ao material produzido, como impermeabilidade por exemplo.

Percebe-se que o produto final de uma etapa é matéria prima de outra, isso permite que a indústria têxtil apresente diversos fluxogramas de produção dependendo do produto final que se deseja produzir e também é possível que uma indústria concentre sua produção em apenas uma atividade como, por exemplo, a fabricação de fios e seja uma fornecedora para outras empresas que desenvolvam outras etapas da fabricação têxtil.

3.1.3 Corantes Utilizados na Indústria Têxtil

A fixação da molécula do corante a fibra geralmente é feita em solução aquosa e pode envolver basicamente 4 tipos de interações: ligações iônicas, de hidrogênio, de Vander Waals e covalentes (GUARATINI & ZANONI, 2000).

Segundo Guaratini e Zanoni (2000), os corantes podem ser classificados conforme sua estrutura química ou de acordo com o método pelo qual o corante é fixado à fibra têxtil. A classificação segundo o modo de fixação dos corantes é apresentada a seguir:

- **Corantes Reativos-** São corantes que contém um grupo reativo capaz de formar ligação covalente com grupos hidroxila, amino e tióis presentes nas fibras. Os principais corantes desse grupo contêm a função azo e antraquinona como grupos cromóforos, responsáveis pela cor, e os grupos clorotriazinila e sulfatoetilsulfonila como grupos reativos. A característica desse grupo de corantes é a alta solubilidade em água e o estabelecimento de uma ligação covalente entre o corante e a

fibra, essa ligação confere maior estabilidade na cor do tecido tingido quando comparado a outros tipos de corantes.

- **Corantes Diretos**- Caracterizam-se como compostos solúveis em água capazes de tingir fibras de celulose como algodão, através de interações de Van der Waals. Esse grupo de corantes é composto por corantes contendo mais de um grupo azo ou pré-transformados em complexos metálicos. A principal vantagem deste grupo de corantes é o alto grau de exaustão durante a aplicação o que resulta numa quantidade menor de corante nas águas de rejeito.
- **Corantes Azóicos**- São compostos insolúveis em água, que são sintetizados sobre a fibra durante o processo de tingimento. O fato de usar um sistema de produção do corante diretamente sobre a fibra permite um método de tingimento de fibras celulósicas com alto padrão de fixação e alta resistência contra luz e umidade.
- **Corantes Ácidos**- O termo corante ácido corresponde a um grande grupo de corantes aniônicos portadores de um a três grupos sulfônicos. No processo de tintura, o corante previamente neutralizado se liga à fibra através de uma troca iônica. Caracterizam-se por substâncias com estrutura química baseada em compostos azo, antraquinona, triarilmetano, azina, xanteno, ketonimina, nitro e nitroso, que fornecem uma ampla faixa de coloração e grau de fixação.
- **Corantes à Cuba**- Grupo dos corantes índigos, tioindigóides e antraquinóides. São aplicados praticamente insolúveis em água, e durante o processo de tintura são reduzidos com ditionito, em solução alcalina, transformando-se em um composto solúvel (forma leuco). Após, a oxidação pelo ar, peróxido de hidrogênio e outros, regenera a forma original do corante sobre a fibra. Apresentam excelentes propriedades de fixação, mas como a produção química de hidrossulfito de sódio pode causar problemas ecológicos, o custo deste grupo de corantes é bastante alto.
- **Corantes de Enxofre**- Grupo de corantes que após a aplicação se caracterizam por compostos macromoleculares com pontes de polissulfetos os quais são altamente insolúveis em água. Utilizados principalmente na tintura de fibras celulósicas, apresentando boa fixação. Este grupo de corantes apresenta resíduos altamente tóxicos.

- **Corantes Dispersivos**- Grupo de corantes insolúveis em água aplicados em fibras de celulose e outras fibras hidrofóbicas através de suspensão. Usualmente o processo de tintura ocorre na presença de agentes dispersantes que estabilizam a suspensão do corante facilitando o contato entre o corante e a fibra hidrofóbica. Usados principalmente para colorir fibras sintéticas como: acetato, celulose, nylon e polyester.
- **Corantes Pré- Metalizados**- Usados para tintura de fibras protéicas e poliamida. São caracterizados pela presença de um grupo hidroxila ou carboxila na posição ortho em relação ao cromóforo azo, permitindo a formação de complexos com íons metálicos. A utilização deste tipo de corante está associada ao alto conteúdo de metal (cromo) nas águas de rejeito.
- **Corantes Branqueadores**- Este grupo de corantes tem a função de eliminar a cor amarelada que as fibras têxteis apresentam quando estão no estado bruto. A diminuição da tonalidade é feita na indústria ou na lavanderia pela oxidação da fibra com alvejantes químicos ou utilizando os corantes brancos também chamados de branqueadores.

O grupo de corantes que tem atraído maior atenção são os que apresentam a função azo-aromático como cromóforo, estes correspondem ao maior grupo de corantes orgânicos produzidos mundialmente. A biotransformação destes corantes pode ser responsável pela formação de compostos potencialmente carcinogênicos. Por volta de 3.000 corantes azo comerciais foram catalogados como cancerígenos e não têm sido mais produzidos por fabricantes responsáveis (GUARATINI & ZANONI, 2000).

Beltrame (2006) destaca o potencial que alguns tipos de corantes, os azocorantes, por exemplo, possuem de se unir a outras moléculas, quando parcialmente degradados, podendo formar compostos que apresentam um nível de toxicidade muito maior do que o composto do corante original.

3.1.4 Consumo de água na indústria têxtil

A indústria têxtil utiliza um grande volume de água em seu processo produtivo uma vez que ela é usada como meio de transporte para adicionar ou remover substâncias ao produto fabricado e, na maioria dos casos, acaba sendo um insumo que não é incorporado ao

produto final. De acordo com Resende (2012) estima-se que para cada 1 Kg de tecido produzido sejam necessários 80L de água.

A utilização da água dentro da indústria têxtil ocorre de forma mais intensa na etapa do beneficiamento, de forma direta nos processos de lavagem, tingimento e amaciamento, e de forma indireta para realizar aquecimento ou resfriamento dos processos da etapa citada (TWARDOKUS, 2004).

Twardokus (2004) comenta que a racionalização do uso da água na indústria têxtil pode ser alcançada através da modernização dos equipamentos, investimento em tecnologia dos processos e produtos que gerem menos resíduos e que necessitem de menor quantidade de água.

3.1.5 Efluente gerado

Conforme a NBR 9800 (ABNT, 1987), efluente líquido industrial é o despejo líquido proveniente do estabelecimento industrial, compreendendo emanções de processo industrial, águas de refrigeração poluídas, águas pluviais poluídas e esgoto doméstico.

A indústria têxtil apresenta grande variedade de combinações de processos produtivos, alto consumo de produtos químicos, diversidade de equipamentos e matérias-primas por isso, as características do efluente gerado apresentam alta variabilidade.

Nas etapas iniciais da fabricação têxtil tem-se a geração de efluentes com restos de produtos utilizados na tecelagem e substâncias das próprias fibras. Na etapa da tinturaria têm-se os corantes que não foram absorvidos pelas fibras durante o processo de tingimento, os mesmos são responsáveis pela cor, sólidos dissolvidos, demanda química de oxigênio (DQO) e demanda biológica de oxigênio (DBO) dos efluentes podendo também, dependendo do tipo e natureza do corante, haver a presença de metais pesados (BELTRAME, 2000).

Na estamparia tem-se o efluente gerado na manutenção e limpeza do material utilizado na fabricação da estampa, sendo o mesmo composto por corantes, pigmentos, produtos auxiliares e restos de solvente (MEZA, 2010). No acabamento final a composição do efluente dependerá do processo ao qual é submetido o material têxtil. Assim, o efluente proveniente da indústria têxtil pode conter substâncias orgânicas e inorgânicas dependendo dos materiais e matérias-primas utilizados no processo industrial.

Resende (2012) apresenta como características do efluente têxtil a difícil degradabilidade, a alta carga de DBO e DQO, o pH

alcalino e a diversidade de contaminantes. Hassemer (2006) descreve que o efluente é caracterizado por vazões e cargas de poluição muito variáveis, diferenças de coloração, pH e temperatura, conjugados com valores elevados de DQO e baixa DBO, alguns sais inorgânicos, compostos orgânicos diversos, e em alguns casos, metais pesados.

A inserção dos efluentes têxteis, sem o devido tratamento, nos corpos d'água pode provocar, além da poluição visual, alterações em ciclos biológicos e a diminuição da qualidade da água. Guaratini e Zanoni (2000) citam a possibilidade de o efluente têxtil, quando lançado em águas naturais sem tratamento prévio, atingir reservatórios e estações de tratamento de água.

Os compostos presentes nos efluentes provenientes da indústria de corantes ou de processos envolvendo tintura têxtil podem diminuir a transparência da água, impedindo a penetração da radiação solar, os rejeitos coloridos diminuem a atividade fotossintética e provocam distúrbios na solubilidade dos gases, causando danos nas guelras e brânquias dos organismos aquáticos, além de perturbar os locais de desova e refúgio. Esses compostos podem permanecer por cerca de 50 anos em ambientes aquáticos, pondo em risco a estabilidade dos ecossistemas e a vida em seu entorno. Os produtos da degradação de grande parte dos corantes nesses ambientes e no homem podem ser ainda mais nocivos que os próprios pigmentos (ZANONI & CARNEIRO, 2001).

3.1.6 Principais tratamentos utilizados

De acordo com Nunes (2012) dependendo das condições das águas receptoras e da eficiência dos processos, pode-se classificar o tratamento de águas residuárias industriais e de esgotos sanitários nos seguintes níveis ou fases:

-Tratamento Preliminar: remove apenas sólidos muito grosseiros, flutuantes e matéria mineral sedimentável. Os processos de tratamento preliminar são as grades, desarenadores, caixas de retenção de óleo e gorduras e as peneiras.

-Tratamento Primário: remove sólidos inorgânicos e matéria orgânica em suspensão. A DBO é removida parcialmente e os sólidos em suspensão quase totalmente. Como processos de tratamento primário têm-se a decantação primária, reatores anaeróbios, flotação, neutralização e a precipitação química.

-Tratamento Secundário: remove sólidos inorgânicos e matéria orgânica dissolvida e em suspensão. A DBO e os sólidos inorgânicos são removidos quase que totalmente. Dependendo do sistema adotado, as eficiências podem ser bem altas. Como processos de tratamento secundário têm-se os processos de lodos ativados, lagoas de estabilização (exceto lagoa anaeróbia única), reatores anaeróbios com alta eficiência, lagoas aeradas, filtros biológicos, precipitação química com alta eficiência.

-Tratamento Terciário ou Avançado: utilizado quando se pretende obter um efluente de alta qualidade, ou a remoção de outras substâncias contidas nas águas residuárias. Os processos de tratamento terciário são os seguintes: adsorção em carvão ativado, osmose reversa, eletrodialise, troca iônica, filtros de areia, remoção de nutrientes, oxidação química, remoção de organismos patogênicos, entre outros.

Na indústria têxtil, os processos de tratamento mais utilizados são os primários e secundários, ou seja, o físico-químico seguido pelo biológico por lodo ativado. Os tratamentos terciários e avançados que envolvem maior tecnologia e custos ainda são pouco utilizados (BELTRAME, 2000).

Na Figura 1, está esquematizada uma estação de tratamento de efluentes utilizando o processo biológico por lodo ativado, tipicamente utilizado no tratamento de efluente têxtil.

O tanque de aeração (reator), o decantador secundário e a recirculação do lodo são unidades integrantes da etapa biológica do sistema lodos ativados. No reator ocorrem as reações bioquímicas de remoção da matéria orgânica e, em alguns casos, da matéria nitrogenada. No decantador ocorre a sedimentação dos sólidos facilitando a clarificação do efluente, os sólidos sedimentados no decantador são recirculados para o reator, aumentando a concentração de biomassa no mesmo, o que é responsável pela alta eficiência do sistema (VON SPERLING, 2002).

O processo de lodo ativado apresenta como ponto negativo o fato de ser bastante sensível à composição do efluente (cargas de choque), além de gerar grande volume de lodo. O sistema apresenta uma eficiência relativamente alta, permitindo a remoção de aproximadamente 80% da carga de corantes. O acúmulo de lodo torna-se um problema crítico, uma vez que o teor de corantes adsorvido é bastante elevado, impedindo qualquer possibilidade de reaproveitamento. Por todos estes motivos, se faz necessário o estudo de

novas alternativas para o adequado tratamento dos efluentes (KUNZ *et al*, 2002).

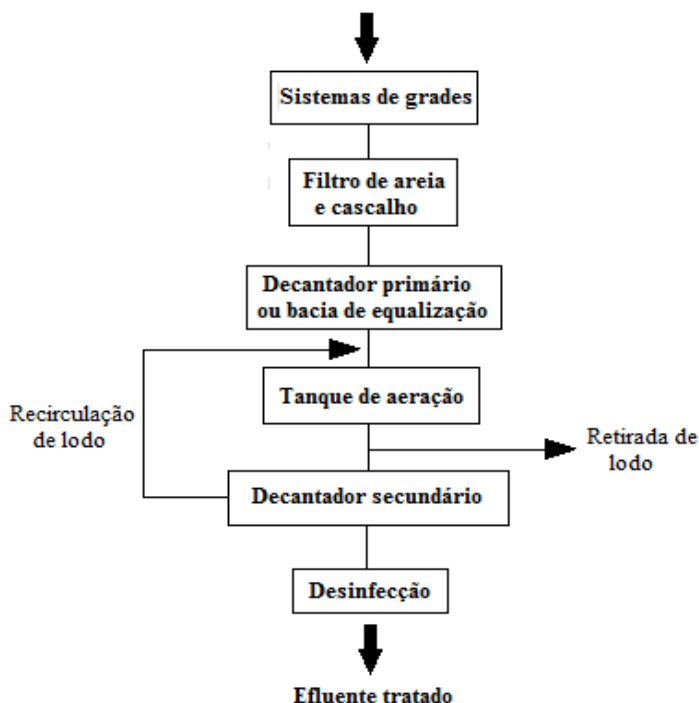


Figura 1. Esquema de uma estação de tratamento de efluentes utilizando lodo ativado. Fonte: METCALF & EDDY *apud* KUNZ *et al* (2002).

3.1.7 Remoção de cor

A remoção dos corantes do efluente é difícil, pois eles são estáveis à luz e ao calor, e são de difícil degradação biológica (FREIRE & FREITAS, 2010). O efluente têxtil é a combinação de águas residuárias de diferentes processos, e a cor é proveniente, principalmente, do processo de tingimento onde os corantes não fixados à fibra são eliminados nas águas residuárias. Entre os diversos tipos de corantes se destacam os reativos por apresentarem simplicidade na aplicação, cores brilhantes, boa solidez à luz, lavagem e suor, porém, apresentam baixa ou média fixação à fibra, podendo restar no banho

residual até 50% dos corantes utilizados no tingimento (BELTRAME, 2006).

A presença de cor no efluente é um indicador de poluição das águas e pode ser detectada mesmo em baixas concentrações (GUARATINI & ZANONI, 2000). A escolha do processo a ser utilizado depende de aspectos econômicos, fatores operacionais como dosagens de produtos químicos, eficiência desejada, quantidade de lodo produzida, grau de inibição ou de substâncias recalcitrantes presentes e da classe de corante a ser tratada (BELTRAME, 2006).

Existem diversos métodos que promovem a remoção dos corantes do efluente têxtil, sendo que a coagulação e adsorção tem sido os mais utilizados segundo Quadros (2005). Existem também métodos mais avançados citados por Kunz *et al* (2002) como a biodegradação, tratamento com ozônio, membranas e POAs.

3.1.7.1 Remoção da cor por Adsorção

Algumas substâncias agem como adsorventes, fixando em sua superfície outras substâncias que produzem gosto, odor e matéria orgânica dissolvida. Entre as substâncias adsorventes pode-se citar a turfa, cinza, areia, carvão ativado entre outros. O carvão ativado é uma substância adsorvente, que possui elevada área superficial muito porosa e apresenta como vantagem o poder de se regenerar (NUNES, 2012).

A adsorção é uma das técnicas que tem sido empregada com sucesso na remoção de corantes, pois associa baixo custo e elevadas taxas de remoção. Além disso, em alguns casos possibilita a recuperação do corante sem perda de sua identidade química por ser um método não destrutivo. O carvão ativado é o mais popular e eficiente adsorvente usado. Entretanto, o alto custo restringe o seu uso, principalmente em países em desenvolvimento (CUNICO *et al*, 2009).

3.1.7.2 Remoção da cor por Coagulação/Floculação

A remoção da cor do efluente têxtil por meio de técnica físico-química acontece em três etapas distintas: coagulação, floculação e separação de líquidos e sólidos (HASSEMER, 2006). A adição de coagulantes promove a formação de flocos que, posteriormente, são removidos da fase aquosa por sedimentação por gravidade, flotação, centrifugação ou filtração.

Processos físico-químicos sozinhos não podem alcançar resultados satisfatórios, mesmo com a adição de coagulantes que podem aumentar a remoção da cor consideravelmente, além disso, esta alternativa envolve um grande consumo de reagentes e uma substancial produção de lodo (HASSEMER, 2006).

3.1.7.3 Remoção da cor por Biodegradação

A grande motivação dos pesquisadores envolvidos em estudos de biodegradação pode ser expressa pela busca contínua de microrganismos versáteis, capazes de degradar de maneira eficiente um grande número de poluentes a um baixo custo operacional. Alguns fungos como o *Phanerochaete chrysosporium*, e bactérias como *Pseudomonas sp* tem mostrado resultados interessantes assim como a utilização de agentes quelantes naturais, produzidos pelos mesmos (KUNZ *et al*, 2002).

3.1.7.4 Remoção da cor por Tratamento com Ozônio

O ozônio é muito efetivo na descoloração de efluentes têxteis porque ele ataca as duplas ligações presentes na estrutura química dos corantes, que estão associadas à cor. O pH e a condutividade praticamente permanecem constantes, enquanto a cor diminui gradualmente durante a ozonização. A remoção da cor de águas altamente coloridas varia em função da dosagem de ozônio e da qualidade do material colorido (HASSEMER, 2006).

Dosagens razoáveis de ozônio permitem uma boa eficiência na remoção da cor para corantes ácidos, mordentes, catiônicos, diretos, reativos e enxofre. Corantes dispersos e tintas são mais difíceis de remover, mesmo com altas concentrações de ozônio. Num primeiro momento a ozonização é empregada principalmente para quebrar as moléculas de corantes, facilitando o tratamento posterior (HASSEMER, 2000).

3.1.7.5 Remoção da cor por Membranas

Membranas podem ser consideradas como películas poliméricas ou inorgânicas semipermeáveis, que atuam como barreiras seletivas para uma filtração em nível molecular, separando duas fases e restringindo,

total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas (solutos) presentes na solução (OLIVEIRA, 2000).

A utilização de membranas tem se tornado muito atrativa devido ao fato de possibilitar o reúso da água no processo industrial (KUNZ *et al*, 2002). A Tabela 1 apresenta a pressão aplicada, tamanho do poro da membrana e as características do material retido de acordo com cada sistema de membrana.

Tabela 1. Características dos processos de separação por membranas.

Processo de separação	Pressão aplicada (atm)	Tamanho do poro (nm)	Material retido
Microfiltração (MF)	1 - 3	20 - 1000	material em suspensão, bactérias (m.m. > 500.000)
Ultrafiltração (UF)	2 - 7	5 - 20	colóides, macromoléculas (m.m. > 5000)
Nanofiltração (NF)	5 - 20	2 - 5	macromoléculas
Osmose reversa (OR)	30 - 150	tamanho do poro não detectável	todo material solúvel e em suspensão

Fonte: KUNZ *et al*, 2002.

3.1.7.6 Remoção da cor por POAs

Cada vez mais é crescente o interesse na aplicação dos processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes. Esta tecnologia possibilita que o composto não apenas seja transferido de fase, mas destruído e transformado em dióxido de carbono, água e ânions, através de reações de degradações que envolvem espécies transitórias oxidantes, principalmente os radicais hidroxilas (TEIXEIRA & JARDIM, 2004).

Kunz *et al* (2002) atenta para o fato de que muitas vezes uma solução bastante inteligente, para o tratamento de um dado efluente, é a utilização de processos combinados para uma melhor eficiência do sistema. Estes métodos podem ser utilizados de maneira complementar, de tal forma que possam suprir deficiências apresentadas pelos processos quando aplicados isoladamente.

3.2 Processos Oxidativos Avançados (POAs)

Os métodos de tratamento de efluentes industriais convencionais podem ser divididos em dois grupos: métodos baseados na transferência de fase e outros, chamados processos oxidativos, baseados na destruição dos poluentes (TEIXEIRA & JARDIM, 2004).

Esses processos caracterizam-se por transformar a grande maioria dos contaminantes orgânicos em dióxido de carbono, água e ânions inorgânicos, através de reações de degradação que envolvem espécies transitórias oxidantes, principalmente os radicais hidroxila que possuem alto potencial redutor, menor que o flúor apenas. São processos limpos e não seletivos, podendo degradar inúmeros compostos independentemente da presença de outros. Podem ser utilizados para destruir compostos orgânicos tanto em fase aquosa, gasosa ou adsorvidos numa matriz sólida (TEIXEIRA & JARDIM, 2004). A Tabela 2 apresenta o potencial redox de algumas espécies oxidantes.

Os radicais hidroxila podem ser gerados através de reações envolvendo fortes oxidantes, como ozônio (O_3) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), semicondutores, como dióxido de titânio (TiO_2) e óxido de zinco (ZnO) e irradiação ultravioleta (MANSILLA *et al*, 1997 *apud* TEIXEIRA & JARDIM, 2004).

Tabela 2. Potencial redox dos principais oxidantes.

Espécie	Potencial Redox (V)
Flúor	3,03
Radical hidroxila	2,80
Oxigênio atômico	2,42
Ozônio	2,07
Peróxido de Hidrogênio	1,78
Permanganato	1,68
Dióxido de cloro	1,57
Cloro	1,36
Iodo	0,54

Fonte: TEIXEIRA & JARDIM, 2004.

Teixeira e Jardim (2004) classificam os processos em sistemas homogêneos e sistemas heterogêneos:

i) Homogêneos: não existe a presença de catalisadores na forma sólida, a degradação do poluente orgânico pode ocorrer por duas maneiras diferentes:

-Fotólise direta com ultravioleta (UV): a luz é a fonte que destrói o poluente. Apresenta baixa eficiência em relação ao processo com radical hidroxila.

-Geração de radical hidroxila: alto poder oxidante, vida curta e é o responsável pela oxidação dos compostos orgânicos. É gerado a partir de oxidantes como H_2O_2 e O_3 , combinados ou não com irradiação.

ii) Heterogêneos: sistemas com a presença de catalisadores sólidos, que são substâncias que aumentam a velocidade da reação para atingir o equilíbrio químico sem sofrer alteração química.

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos POAs separados em homogêneos e heterogêneos.

Souza (2009) cita uma série de vantagens dos POAs, como:

- Mineralização do poluente, não ocorrendo apenas o processo de transferência de fase;
- Muito utilizados para compostos resistentes aos outros tipos de tratamento;
- Transformam produtos recalcitrantes em compostos biodegradáveis;
- Podem ser usados em processos combinados, como pré ou pós-tratamento;
- Tem forte poder oxidante com elevada cinética de reação;
- Geralmente não precisam de pós-tratamento ou disposição final;
- Se for usado oxidante em concentração suficiente, mineralizam o contaminante e não geram subprodutos;
- Geralmente melhoram as propriedades organolépticas da água tratada;
- Em muitos casos consomem menos energia, diminuindo custos;
- Possibilitam tratamento *in situ*.

Tabela 3. Sistemas típicos de POA.

Sistemas Homogêneos		Sistemas Heterogêneos	
Com Irradiação	Sem Irradiação	Com Irradiação	Sem Irradiação
O ₃ /UV	O ₃ /H ₂ O ₂	TiO ₂ /O ₂ /UV	Eletro-Fenton
H ₂ O ₂ /UV	O ₃ /OH-	TiO ₂ /H ₂ O ₂ /UV	
Feixe de elétrons	H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ (Fenton)		
US			
H ₂ O ₂ /US			
UV/US			
H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ /UV (Foto-Fenton)			

Fonte: Adaptado de TEIXEIRA & JARDIM, 2004.

3.2.1 Processo Fenton

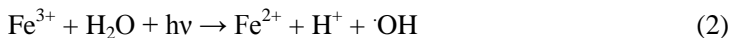
A reação Fenton é aquela onde a geração de radicais hidroxila é feita por decomposição de H₂O₂ catalisada por Fe²⁺ em meio ácido (Equação 1) (TEIXEIRA & JARDIM, 2004).



Os íons férricos formados podem decompor H₂O₂ cataliticamente a H₂O e O₂, as reações são dependentes do pH (NOGUEIRA *et al.*, 2007). Durigan, Vaz e Peralta-Zamora (2012) destacam como principais vantagens do processo Fenton a simplicidade operacional e a sua elevada eficiência de degradação, a qual pode ser ainda melhorada pela incorporação de radiação (ultravioleta ou visível).

3.2.2 Processo Foto-Fenton

O processo que combina a reação de Fenton com radiação ultravioleta, para produzir uma maior eficiência de degradação, é chamado Foto-Fenton (Equação 2) (TEIXEIRA & JARDIM, 2004).



O Fe^{2+} gerado durante a irradiação, quando na presença de peróxido de hidrogênio, reage com este dando sequência à reação de Fenton. Dessa forma, a reação é catalítica e é estabelecido um ciclo em que o Fe^{2+} é regenerado (NOGUEIRA *et al.*, 2007).

De acordo com Nogueira e Modé (2002), o aumento da eficiência promovido pela utilização de irradiação é atribuído à:

- fotorredução de íons Fe (III) formando íons Fe (II) que reagem com H_2O_2 , dando continuidade ao ciclo;
- aumento da decomposição de H_2O_2 pela absorção da luz UV;
- fotólise de complexos orgânicos de Fe (III) gerados durante a decomposição, caracterizando uma fonte adicional de $\cdot\text{OH}$.

Quando complexos de Fe (III) são irradiados, ocorre a promoção de um elétron de um orbital centrado no ligante para um orbital centrado no metal, chamada de transferência de carga ligante-metal, que implica na redução de Fe (III) a Fe (II) e oxidação do ligante, formando radical hidroxila (LANGFORD & CAREY, 1975 *apud* NOGUEIRA *et al.*, 2007).

A absorvância de íons férricos pode se estender até a região do visível, dependendo do pH, pois o pH influencia a formação de espécies hidroxiladas, as quais apresentam maior absorção na faixa de luz visível. A espécie $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ apresenta máximo de absorvância em comprimento de onda de 300 nm, estendendo-se até aproximadamente 400 nm, o que permite que a irradiação solar seja utilizada na reação Foto-Fenton. (NOGUEIRA *et al.*, 2007).

Segundo Nogueira e Modé (2002) o processo Foto-Fenton apresenta, além da sua alta eficiência, algumas vantagens com relação a outros processos como:

- o baixo custo;
- pronta disponibilidade comercial do oxidante;
- apresenta características espectrais que permitem utilizar a energia solar incidente, reduzindo custos com energia;
- o ferro, elemento não tóxico, pode ser separado da água residual, no final do processo, de maneira fácil por precipitação com elevação do pH;
- o peróxido de hidrogênio é consumido durante a reação e é considerado ambientalmente benigno.

Velásquez *et al.*, (2014), ao analisarem a degradação do composto sulfatiazol pelas reações Fenton e Foto-Fenton, observaram

que o sistema Foto-Fenton foi duas vezes mais rápido que o sistema Fenton, apresentando também maior remoção do carbono orgânico total (COT). Para Samet, Hmani e Abdelhédi (2012) o processo Foto-Fenton solar mostrou-se 50% mais eficiente que o processo Fenton, na degradação de inseticida clorpirifós.

A aplicação da reação Foto-Fenton tem apresentado resultados satisfatórios no tratamento de efluentes da indústria de laticínios (VILLA, SILVA & NOGUEIRA, 2007), na degradação de compostos fenólicos (FREIRE, 2012), fármacos (MELO, 2007; BAUTITZ, 2010), pesticidas (LAPERTOT *et al.*, 2006). Diversos trabalhos envolvendo a aplicação dos processos Fenton e Foto-Fenton no efluente têxtil e nos corantes utilizados pela indústria têxtil têm sido realizados, devido a elevada eficiência na descoloração e mineralização do efluente (MARTINS *et al.*, 2011; SALGADO *et al.*, 2009; MANENTI *et al.*, 2010; ARAÚJO, 2002; HOPPER, 2007; ZANELLA *et al.*, 2010).

3.2.3 Utilização de complexos de ferro em reações Fenton e Foto-Fenton

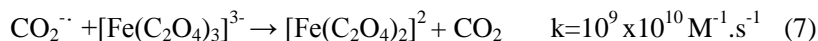
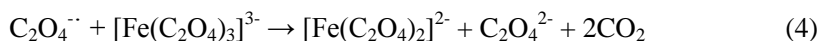
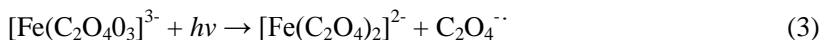
A utilização de complexos orgânicos de ferro nas reações Fenton e Foto-Fenton tem-se mostrado vantajosa, pois permite que se trabalhe com faixas de pH mais amplas e proporciona um aumento da eficiência de absorção da luz (NOGUEIRA *et al.*, 2007). De acordo com Almeida (2013) vários compostos podem ser utilizados na formação de complexos de ferro, tais como ácido ascórbico, ácido cítrico, ácido etilenodiaminotetracético (EDTA), ácido glucônico, ácido oxálico e ácido tartárico.

O ferrioxalato de potássio (FeOx) é um complexo de Fe(III) bastante estudado em processos Foto-Fenton, uma vez que apresenta grande sensibilidade à irradiação para comprimentos de onda entre 200 e 500 nm, gerando Fe^{2+} e CO_2 em meio ácido e por possuir rendimento quântico de geração de Fe(II) 1,24 em 300 nm. Isso significa que, quando o FeOx é irradiado, a fotoredução de Fe(III) a Fe(II) é mais favorecida, disponibilizando Fe(II) no meio para a continuação do ciclo e a consequente geração de $\cdot\text{OH}$ (SILVA, 2007; BAUTITZ, 2010).

O FeOx apresenta absorvidade máxima da ordem de 10^3 - 10^4 L mol⁻¹ cm⁻¹ no intervalo de 200 a 480 nm. Isso permite que a radiação solar seja utilizada como uma alternativa economicamente viável, pois permite diminuir os custos com energia durante a degradação de contaminantes orgânicos por processo Foto-Fenton (BAUTITZ, 2010).

A fotólise de FeOx que ocorre durante o processo de degradação, gera outros radicais orgânicos também capazes de oxidar o composto alvo. Assim, além de aumentar a eficiência do sistema, a fotólise proporciona também o consumo da matéria orgânica adicional proveniente do oxalato (SAFARZADEH-AMIRI; BOLTON; CATER, 1996).

As principais reações envolvendo o ferrioxalato no processo Foto-Fenton são apresentadas nas reações 3-7. A reação 3 demonstra a principal rota de formação de íons Fe^{2+} . A reação 7 mostra que os íons Fe^{2+} também podem ser formados na ausência de luz (CHO *et al*, 2004).



3.2.4 Fatores que influenciam em processos que empregam reagente Fenton

Estima-se que os principais parâmetros que influenciam nos processos empregando reagente Fenton são: a concentração do catalisador (ferro), a concentração de H_2O_2 e o pH, principalmente pela relação estequiométrica que estes apresentam na geração de radicais hidroxila (DURIGAN, VAZ & PERALTA-ZAMORA, 2012; LANGE *et al*, 2006; SOUZA, 2009).

Processos Fenton e Foto-Fenton apresentam a necessidade de controle do pH do meio, uma vez que o mesmo que pode influenciar diretamente na formação das espécies hidroxiladas de ferro o que, consequentemente afeta a velocidade de degradação. Vários estudos indicam a faixa de pH entre 2,5 e 3,0 como sendo uma faixa que proporciona a máxima eficiência de degradação. Em meio com pH maior que 3 ocorre a precipitação de Fe (III) diminuindo a interação com o peróxido de hidrogênio e também a geração dos radicais hidroxila. Em meio com pH menor que 2,5 as altas concentrações de H^+ podem sequestrar os radicais hidroxila diminuindo a velocidade de degradação (NOGUEIRA *et al.*, 2007; SOUZA, 2009).

A necessidade de manter uma faixa específica de pH para obter a máxima eficiência dos processos Fenton e Foto-Fenton, se apresenta como uma limitação dos mesmos, pois além da necessidade do ajuste do pH há a necessidade de neutralização do efluente antes do descarte em corpos d'água (NOGUEIRA *et al.*, 2007).

Teixeira e Jardim (2004) destacam que em processos que utilizam peróxido de hidrogênio, sozinho ou combinado com UV ou sais de ferro, o oxidante deve ser usado em quantidade adequada para que não tenha residual o que seria um gasto desnecessário, e é importante lembrar que o peróxido de hidrogênio pode interferir em algumas análises como a DQO e, caso seja utilizado antes de processo biológico, pode interferir na eficiência do mesmo. O excesso de H_2O_2 pode atuar como sequestrador de radical hidroxila, formando o radical hidroperoxila ($HO_2\bullet$), o qual apresenta um menor potencial de redução que o radical hidroxila ($\bullet OH$), prejudicando o processo de degradação (NOGUEIRA *et al.*, 2007).

A concentração de ferro influencia diretamente na cinética da reação, uma vez que o ferro é o catalisador da decomposição do peróxido de hidrogênio para a formação de radicais hidroxila (FREIRE, 2012). Quando a quantidade de Fe^{2+} excede a de H_2O_2 , o tratamento tende a apresentar um efeito de coagulação química. Já com a H_2O_2/Fe^{2+} contrária o tratamento tem efeito de oxidação química (NEYENS & BAYENS, 2003 *apud* LANGE *et al.*, 2006).

3.3 Reúso de efluentes tratados

A utilização de grandes quantidades de água pela indústria têxtil, a escassez das reservas de água, juntamente com questões econômicas e ambientais fazem com que as empresas busquem alternativas para possibilitar o reúso de águas residuárias. A prática do reúso está diretamente ligada à redução de custos do processo produtivo.

O reúso de águas residuárias, a eliminação do uso de matérias-primas tóxicas, o aumento da eficiência no uso de matérias-primas, água ou energia, redução na geração de resíduos e efluentes, entre outros, são procedimentos fundamentais para a inserção da Produção mais Limpa (P+L) nos processos de produção. O conceito de P+L pode ser resumido como uma série de estratégias, práticas e condutas econômicas, ambientais e técnicas, que evitam ou reduzem a emissão de poluentes no meio ambiente por meio de ações preventivas, ou seja, evitando a geração de poluentes ou criando alternativas para que estes sejam

reutilizados ou reciclados. Essas estratégias podem ser aplicadas a processos, produtos e até mesmos serviços (BASTIAN & ROCCO, 2009).

No Brasil, não há legislação específica sobre o reúso de efluentes na indústria, contudo, existe a obrigatoriedade do tratamento antes do descarte, prevista na Resolução 430/2011 do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, que estabelece os parâmetros de qualidade para lançamento do efluente em corpos receptores. Há também a Lei Ambiental 9605/1998, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas aos responsáveis por atividades prejudiciais ao meio ambiente. A cobrança pelo uso da água prevista na Lei 9433/97 – Política Nacional de Recursos Hídricos, e a escassez de recursos hídricos estão estimulando a prática de reciclagem de água para usos não potáveis e em processos industriais (RESENDE, 2012).

A Organização Mundial da Saúde (1973) (*apud* MANCUSO & SANTOS, 2003) define os tipos de reúso como:

- i) Reúso indireto: ocorre quando a água já utilizada, para uso doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente a jusante, de forma diluída;
- ii) Reúso direto: é o uso planejado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquífero e água potável;
- iii) Reciclagem interna: é o reúso da água internamente à instalação industrial, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição.

Para Mancuso e Santos (2003), o reúso para fins industriais pode ser visualizado sob diversos aspectos, conforme as possibilidades existentes no contexto interno ou externo às indústrias. Uma classificação arbitrária e auxiliar dessas modalidades pode ser a seguinte:

- i) *Reúso macroexterno*: esgoto tratado fornecido pelas companhias municipais ou estaduais de saneamento para as indústrias. Os usos industriais podem ser para:

- Torres de resfriamento;

- Caldeiras;

- Lavagem de peças e equipamentos, principalmente nas indústrias mecânica e metalúrgica;

- Irrigação de áreas verdes de instalações industriais, lavagens de pisos e veículos;

- Processos industriais

ii) *Reúso macrointerno*: O custo elevado da água industrial no Brasil tem estimulado as indústrias a avaliar as possibilidades internas de reúso. Essa tendência tende a se ampliar ante as novas legislações associadas aos instrumentos de outorga e cobrança pela utilização dos recursos hídricos, tanto na tomada de água como nos despejos de efluentes. Dentro do critério de estabelecer prioridades para usos que já possuam demanda imediata e que não exijam níveis elevados de tratamento, é geralmente conveniente concentrar a fase inicial do programa de reúso interno em torres de resfriamento.

iii) *Reúso interno específico*: consiste na reciclagem de efluentes de qualquer processo industrial, nos próprios processos nos quais são gerados, ou em outros processos que se desenvolvem em sequência e que suportam a qualidade do efluente em questão.

De acordo com Mancuso e Santos (2003) no setor urbano, o potencial de reúso de efluentes é muito amplo e diversificado, sendo possível a utilização de efluentes tratados para fins potáveis e não potáveis, desde que obedeçam a alguns critérios indicados a seguir.

i) Usos urbanos para fins potáveis: a presença de organismos patogênicos, metais pesados e compostos orgânicos sintéticos nos efluentes torna o reúso para fins potáveis uma alternativa associada a altos riscos tornando-o inaceitável. A prática de reúso urbano para fins potáveis só poderá ser considerada garantindo-se a adequada operação dos sistemas de tratamento e distribuição e de vigilância sanitária.

ii) Usos urbanos para fins não potáveis: envolvem riscos menores e devem ser considerados como a primeira opção de reúso na área urbana. Cuidados especiais devem ser tomados quando ocorre contato direto do público com gramados de parques, jardins, hotéis, áreas turísticas e campos de esporte. Os maiores potenciais de reúso são:

- irrigação de parques e jardins públicos, centros esportivos, gramados, árvores e arbustos;
- irrigação de áreas ajardinadas ao redor de prédios públicos, residenciais e industriais;
- reserva de proteção contra incêndios;
- sistemas decorativos aquáticos, como fontes e chafarizes;
- descarga sanitária em banheiros públicos e em edifícios comerciais e industriais;
- lavagem de trens e ônibus;
- controle de poeira em obras de aterros, terraplenagem;
- construção civil, na preparação e cura de concreto, compactação de solos.

De acordo com Resende (2012), a água utilizada na indústria têxtil precisa apresentar pH próximo ao neutro, não conter substâncias que possam provocar espuma, manchas ou prejudicar o beneficiamento, como ferro, manganês, magnésio e cloro, além de evitar danos nas tubulações e máquinas. Desde que o efluente tratado atenda as exigências de qualidade, o mesmo pode ser utilizado em qualquer processo dentro da indústria.

A Tabela 4 apresenta um levantamento realizado pela FIESP (2004) que indica os parâmetros de qualidade de água exigidos para utilização em processos da indústria têxtil.

Tabela 4. Requisitos de qualidade de água para uso na indústria têxtil.

Parâmetros	Processo			
	Engomagem	Lavagem	Branqueamento	Tingimento
Cor (UH)	5	5	5	5
Dureza CaCO ₃ (mg/L)	25	25	25	25
Ferro (mg/L)	0,3	0,1	0,1	0,1
Manganês (mg/L)	0,05	0	0,01	0,01
pH	6,5 - 10,0	3,0 - 10,5	2,0 - 10,5	3,5 - 10,0
SDT (mg/L)	100	100	100	100
SS (mg/L)	5	5	5	5

Fonte: NEMEROW & DASGUPTA (1991) *apud* FIESP (2004).

Manual de Conservação e Reúso de Água (FIESP, 2004) apresenta os seguintes benefícios da prática do reúso:

- Benefícios ambientais:

- Redução do lançamento de efluentes em cursos d'água;
- Redução da captação de águas superficiais e subterrâneas;
- Aumento na disponibilidade de água para usos mais exigentes.

- Benefícios econômicos:

- Conformidade ambiental em relação a padrões e normas ambientais estabelecidos;

- Mudanças nos padrões de produção e consumo;
- Redução dos custos de produção;
- Aumento da competitividade do setor;
- Habilitação para receber incentivos e coeficientes redutores dos fatores da cobrança pelo uso da água.

- Benefícios sociais:

- Ampliação da oportunidade de negócios para as empresas fornecedoras de serviços e equipamentos, e em toda a cadeia produtiva;
- Ampliação na geração de empregos diretos e indiretos;
- Melhoria da imagem da empresa junto à sociedade.

4. METODOLOGIA

Todos os experimentos foram realizados no LARA (Laboratório de Reúso de Águas), pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) entre os meses de setembro e novembro de 2014.

Os experimentos foram realizados em duas etapas. Na etapa 1 foram realizados ensaios preliminares para otimização do processo através de um planejamento fatorial. Os melhores resultados desse planejamento foram utilizados na etapa 2 em que se realizou dois experimentos com lâmpadas de diferentes potências para avaliar o processo Foto-Fenton.

4.1 Efluente têxtil utilizado nos experimentos

As amostras do efluente têxtil utilizadas neste trabalho foram fornecidas por uma indústria de tinturaria, localizada na região do município de Brusque no estado de Santa Catarina. A coleta do efluente foi realizada logo após o tanque de aeração (reator) do sistema de lodos ativados.

4.2 Reatores utilizados

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois reatores. O primeiro foi um reator do tipo STERILIGHT modelo SSM-24 (Figura 2), trata-se de um reator de fluxo de pistão, de forma cilíndrica e que internamente possui uma lâmpada de vapor de mercúrio de baixa

pressão monocromática (25W e 9000h de vida útil), com emissão de radiação ultravioleta a 254 nm recoberta por um tubo de quartzo. O volume útil do reator é de 1,1 litros.



Figura 2. Reator STERILIGHT modelo SSM-24.

O segundo reator utilizado foi um reator fotoquímico com volume útil de 1L que possui entrada para adição de reagentes e saída para retirada das amostras. O sistema (Figura 3) foi mantido sob agitação magnética e refrigeração através de um sistema de recirculação de água, e possuía uma lâmpada de vapor de mercúrio de 125 W de potência, inserida em um tubo de quartzo.

A lâmpada utilizada é de média pressão policromática que emite radiação ultravioleta na faixa de 290 a 390 nm com emissão de luz média de $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. A emissão de luz foi medida através de um fotômetro digital modelo MRU- 201 da INSTRUTHERM, que mede entre 290nm e 390nm (UVA-UVB). A lâmpada testada foi ligada e o fotômetro foi aproximado, ficando a uma distância de 15 cm da lâmpada até o valor da leitura estabilizar no visor do fotômetro (aproximadamente 4 minutos), foram realizadas três leituras. A Figura 4 ilustra a lâmpada de vapor de mercúrio de média pressão utilizada no experimento 2.

A lâmpada era inserida pela parte superior do reator e todo o conteúdo do mesmo foi mantido sob agitação magnética durante os ensaios.

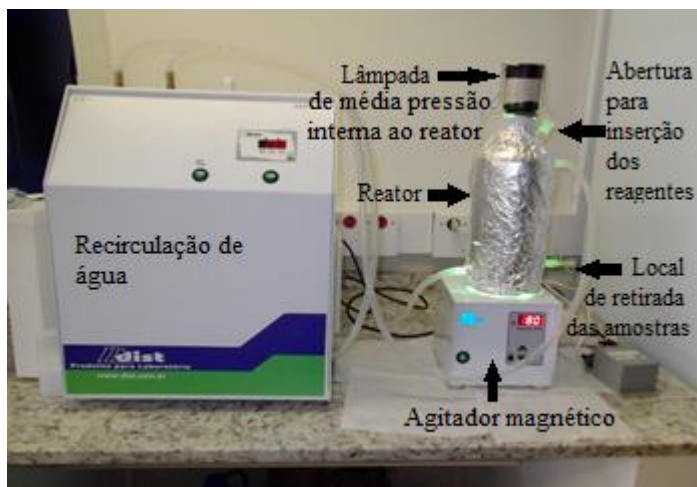


Figura 3. Sistema utilizado: reator fotoquímico e aparelho para recirculação de água para a refrigeração.



Figura 4. Lâmpada de vapor de mercúrio de média pressão.

4.3 Reagentes

O ferrioxalato de potássio (FeOx), foi preparado a partir do oxalato de potássio e cloreto férrico, conforme a Equação 8 (DANIEL, 2001).



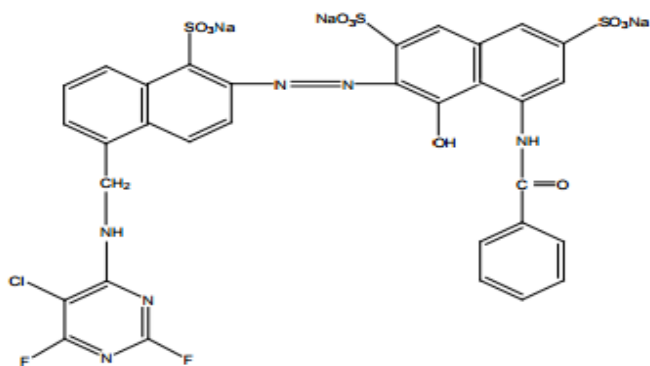
Os corantes reativos utilizados nos ensaios preliminares foram: Levafix brilliant red E4BA, Remazol Preto B 133% e *Levafix Yellow E-3RL* (Reactive orange 30) da DyStar. Estes foram utilizados em solução

aquosa (150 mg.L^{-1}). A estrutura molecular dos corantes está apresentada na Figura 5.

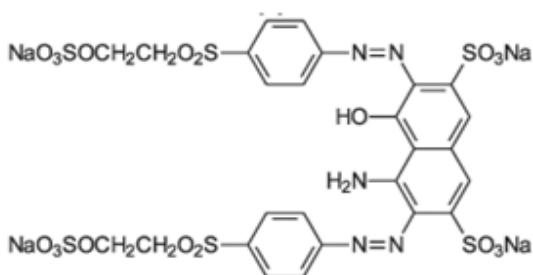
A Tabela 5 apresenta os reagentes utilizados neste trabalho.

Tabela 5. Reagentes utilizados.

Reagente	Grau Analítico	Título	Procedência
Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)	P.A.	96,00%	PANREAC
Meta vanadato de amônio (NH_4VO_3)	P.A.	99,00%	VETEC
Oxalato de Potássio Monohidratado ($\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	P.A.	98,50%	VETEC
Sulfito de Sódio Anidro (Na_2SO_3)	P.A.	97,00%	VETEC
Cloreto de ferro (ICO) (FeCl_3)	P.A.	98,00%	BIOTEC
Peróxido de hidrogênio 100V (H_2O_2)	-	36,00%	LAFAN
Hidróxido de Sódio perolado (NaOH)	P.A.	97,00%	LAFAN



a) Levafix brilliant red E4BA



b) Remazol Preto B 133%

Figura 5. Estrutura molecular dos corantes.

A estrutura do corante *Levafix Yellow E-3RL* (Reactive orange 30) não foi encontrada na literatura consultada.

4.4 Procedimentos experimentais

Os procedimentos experimentais foram realizados em duas etapas:

- Etapa 1: Ensaios preliminares

Com o objetivo de determinar as melhores condições experimentais a serem utilizadas, foi realizado um planejamento fatorial 2^3 com ponto central (em triplicata), apresentando como resposta o

percentual de descoloração da mistura de corantes submetida ao processo Foto-Fenton com tempo de exposição a radiação UV igual a 6 minutos, que foi o menor tempo em que se observou a remoção de cor (resultados não apresentados).

Os valores das dosagens para as três variáveis, apresentados na Tabela 6, foram estimados com base nos trabalhos de Salgado, *et al* (2009); Durigan, Vaz & Zamora (2012) e Zanella *et al* (2010). O valor do oxalato de potássio segue a relação estequiométrica da reação sendo igual ao triplo da concentração de ferro.

Tabela 6. Valores dos níveis das variáveis.

Variáveis	Nível (-)	Nível (0)	Nível (+)
[Fe ²⁺]	5 mg.L ⁻¹	10 mg.L ⁻¹	15 mg.L ⁻¹
[H ₂ O ₂]	100 mg.L ⁻¹	150 mg.L ⁻¹	200 mg.L ⁻¹
pH	4	5	6

Os ensaios preliminares foram feitos em bateladas no reator STERILIGHT modelo SSM-24. Após inserir 900 ml do efluente no reator foram adicionados os reagentes, em concentrações de acordo com o planejamento fatorial. No momento em que se inseria o peróxido de hidrogênio, agente oxidante, começava-se a contagem do tempo de exposição à radiação UV que foi igual a 6 minutos e então fazia-se a leitura da cor.

- Etapa 2: Experimentos 1 e 2

Com o resultado do planejamento fatorial partiu-se para a realização dos experimentos. Inicialmente utilizou-se o reator STERILIGHT modelo SSM-24, com a lâmpada de baixa pressão, para realizar o Experimento 1 que ocorreu em batelada com tempo de exposição à radiação UV igual a 120 minutos.

Antes do início dos ensaios o pH da amostra foi corrigido com ácido sulfúrico (H₂SO₄) e/ou hidróxido de sódio (NaOH). Após corrigir o pH, um volume de 1 litro do efluente foi colocado no reator junto com as dosagens de FeOx e H₂O₂; no instante em que o H₂O₂ foi inserido, um cronômetro foi disparado para dar início a contagem do tempo de irradiação UV.

Em tempos pré-determinados (5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 minutos) foram coletadas amostras para leitura de cor e as amostras destinadas a análise de COT dissolvido foram coletadas nos tempos 45 e 120 minutos. Ao final do ensaio foram separadas amostras para as análises de sólidos, ferro total e ferroso, alcalinidade e pH.

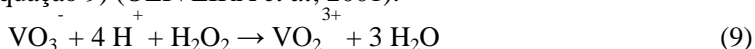
Após a realização do Experimento 1 foi utilizado o reator fotoquímico, com a lâmpada de média pressão, para a realização do Experimento 2. O Experimento 2 foi feito em duplicata da mesma maneira descrita para o Experimento 1. O tempo total de exposição à radiação UV foi de 120 minutos. As amostras para a análise de COTd foram coletadas nos tempos 45 e 120 minutos. Ao final do ensaio foram separadas amostras para análise de sólidos, ferro total e ferroso, alcalinidade e pH.

4.5 Análises realizadas

As seguintes análises foram realizadas:

4.5.1 Peróxido de hidrogênio residual

O monitoramento da concentração do peróxido de hidrogênio, para verificar a presença de H₂O₂ durante o tempo de reação, que foi de 120 minutos, foi realizado através da colorimetria da geração de peroxivanádio (V) que possui uma coloração vermelha causada pela reação entre o íon vanadato e peróxido de hidrogênio em meio ácido (Equação 9) (OLIVEIRA *et al*, 2001):



Foi construída uma curva de calibração, apresentada no Apêndice 1, para determinação do peróxido de hidrogênio residual montada a partir da medida da absorvância de amostras com concentrações conhecidas de peróxido de hidrogênio. As soluções analíticas contendo H₂O₂ são preparadas em água por diluição apropriada do reagente H₂O₂ 100 v. Foram analisadas as concentrações 0, 25, 50, 100, 150, 200 mg/L.

Para análise, foram adicionados 3 mL de amostra, 6 mL da solução de vanadato de amônio. A absorvância foi medida em espectrofotômetro DR 5000 da HACH.

4.5.2 pH

Para realizar os ajustes do pH foi utilizado um pHmetro, devidamente calibrado, modelo ORION 3 STAR da Thermo Scientific.

4.5.3 Cor

A cor foi medida através da leitura em espectrofotômetro, modelo DR 5000 da HACH, da absorvância no comprimento de onda de máxima absorção apresentada pelo efluente bruto. Para o efluente em análise o comprimento de onda de máxima absorvância foi 400 nm.

4.5.4 Carbono Orgânico Total dissolvido (COTd)

As análises de COTd foram realizadas no equipamento modelo TOC-L da empresa Shimadzu. Os dados de carbono orgânico total dissolvido foram expressos em um monitor na unidade de mg/L.

4.5.5 Ferro

A análise do Ferro Total foi feita utilizando o Kit Hach Ferro Ver Method, a análise do íon ferroso foi feita utilizando o Kit Hach Phenantroline Method, para ambas as análises, as leituras foram feitas no Espectrofotômetro Hach modelo DR/2010.

4.5.6 Sólidos Totais (ST), Sólidos em Suspensão Totais (SST) e Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

O método utilizado para a medição dos ST e SST foi o gravimétrico, descrito no Standard Methods (APHA,1992). Os SDT foram obtidos pela relação: $SST=ST-SDT$.

4.5.7 Alcalinidade

A alcalinidade foi medida através do método de titulação potenciométrica utilizando solução de H_2SO_4 0,02N.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaios preliminares de otimização

Os resultados obtidos com a realização do planejamento fatorial estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Planejamento fatorial 2^3 com ponto central para a otimização do processo Foto-Fenton na degradação do efluente têxtil com resposta em porcentagem de descoloração em tempo de seis minutos de exposição à radiação UV.

Variáveis		Nível (-)		Nível (0)	Nível (+)
[Fe ²⁺]		5 mg.L ⁻¹		10 mg.L ⁻¹	15 mg.L ⁻¹
[H ₂ O ₂]		100 mg.L ⁻¹		150 mg.L ⁻¹	200 mg.L ⁻¹
pH		4		5	6
Exp.	[Fe ³]	pH	H ₂ O ₂	Resposta	% de redução da cor
E1	-	-	-	1,192	69,0
E2	+	-	-	0,321	91,6
E3	-	+	-	1,761	54,2
E4	+	+	-	0,789	79,5
E5	-	-	+	0,671	82,5
E6	+	-	+	0,171	95,6
E7	-	+	+	1,348	64,9
E8	+	+	+	0,508	86,8
E9	0	0	0	0,433	88,8
E10	0	0	0	0,439	88,6
E11	0	0	0	0,577	85,0

Efeitos Principais: [Fe³]: +20,701 ± 2,12; [H₂O₂]: +8,877 ± 2,12; pH: -13,339 ± 2,12.

Efeitos Combinados: [Fe³] x [H₂O₂]: -3,271 ± 2,12; [H₂O₂] x pH: 0,150 ± 2,12; pH x [Fe³]: +2,868 ± 2,12.

[Fe³] x [H₂O₂] x pH: 1,554 ± 2,12

O planejamento fatorial mostra a influência que cada variável apresenta sobre a resposta e a interação entre elas, por isso foram calculados os efeitos principais (de cada variável isolada) e de interação entre as variáveis.

Os efeitos principais $[\text{Fe}^3]$, $[\text{H}_2\text{O}_2]$ e pH juntamente com os efeitos combinados $[\text{Fe}^3] \times [\text{H}_2\text{O}_2]$ e $\text{pH} \times [\text{Fe}^3]$ apresentam influência significativa, uma vez que seus valores numéricos são superiores ao do desvio padrão (2,12%), calculado a partir do ensaio em triplicata.

O experimento que apresentou melhor resposta foi o experimento 6, com: concentração de ferro: 15 mg.L^{-1} , concentração de peróxido: 200 mg.L^{-1} e pH:4. Embora o melhor resultado tenha sido apresentado pelo experimento 6, 95,6% de remoção de cor, o experimento 8 apresentou um resultado satisfatório, 86,8 % de remoção de cor com pH 6 o que elimina a necessidade de neutralizar o efluente no final do processo. Por isso, optou-se por prosseguir com os ensaios utilizando as dosagens referentes ao experimento 8.

5.2 Efluente do sistema lodos ativados (após o reator) utilizado nos experimentos

A seguir na Tabela 8, são apresentados os valores dos parâmetros analisados do efluente têxtil utilizado nos experimentos.

Tabela 8. Parâmetros do efluente do sistema lodos ativados (após o reator) utilizado nos experimentos.

Efluente têxtil do sistema lodos ativados (após o reator)	
ST (mg/L)	7112
SST (mg/L)	88
SDT (mg/L)	7024
Alcalinidade (mgCaCO_3/L)	915
pH	8,2
COTd (mg/L)	269,8

5.3 Cor

Os resultados obtidos nas análises de cor para verificar a remoção da coloração, conseguida com a aplicação do processo Foto-Fenton utilizando $[\text{Fe}^{2+}] = 15 \text{ mg/L}$, $[\text{H}_2\text{O}_2] = 200 \text{ mg/L}$ e $\text{pH} = 6$, condições determinadas nos ensaios preliminares de otimização, estão apresentados na Figura 6.

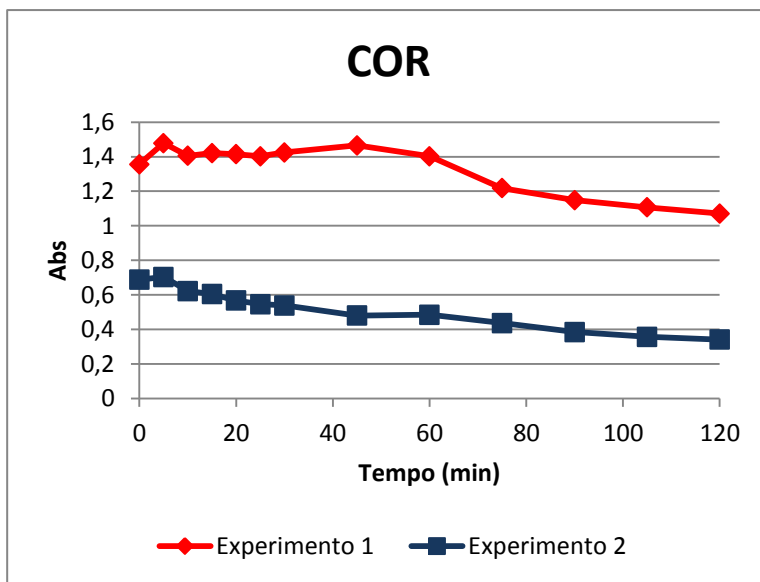


Figura 6. Resultados da análise de remoção de cor.

De acordo com a Figura 6, o experimento 2 apresentou 50% de remoção de cor contra 21% obtido com o experimento 1. Nos resultados apresentados pelos experimentos 1 e 2, pode-se observar que em determinados momentos a leitura da cor foi maior que a leitura anterior, isso pode ser explicado pela presença dos sólidos no efluente têxtil utilizado nos experimentos, que podem ter interferido na leitura da cor.

Na Figura 7, estão apresentados o efluente têxtil, utilizado nos experimentos, e o efluente final do experimento 2 que apresentou a maior remoção de cor.

Observa-se que nos experimentos 1 e 2 a porcentagem de remoção de cor foi menor do que aquela obtida nos ensaios preliminares de otimização, utilizando o mesmo pH e as mesmas concentrações de ferro e peróxido de hidrogênio. Isso pode ser justificado pela diferença de composição entre o efluente utilizado nos experimentos, e a mistura de corantes, utilizada nos ensaios preliminares de otimização. Também pode-se destacar a presença de sólidos no efluente têxtil, coletado após o reator do sistema de lodos ativados, que podem ter prejudicado a ação da radiação UV no processo Foto-Fenton.



Figura 7. Efluente têxtil utilizado nos experimentos e efluente final do experimento 2.

5.4 COT dissolvido (COTd)

Os resultados das análises de carbono orgânico total dissolvido das amostras analisadas após o processo Foto-Fenton com tempo de exposição à radiação UV igual a 120 minutos, estão expressos na Figura 8.

De acordo com Cavalcante (2012) o COT é considerado a soma de todos os carbonos ligados a espécies orgânicas dissolvidas ou não. Assim, a análise desse parâmetro fornece informações relativas à mineralização dos compostos orgânicos presentes. As medidas de COT indicam a eficiência da degradação do processo.

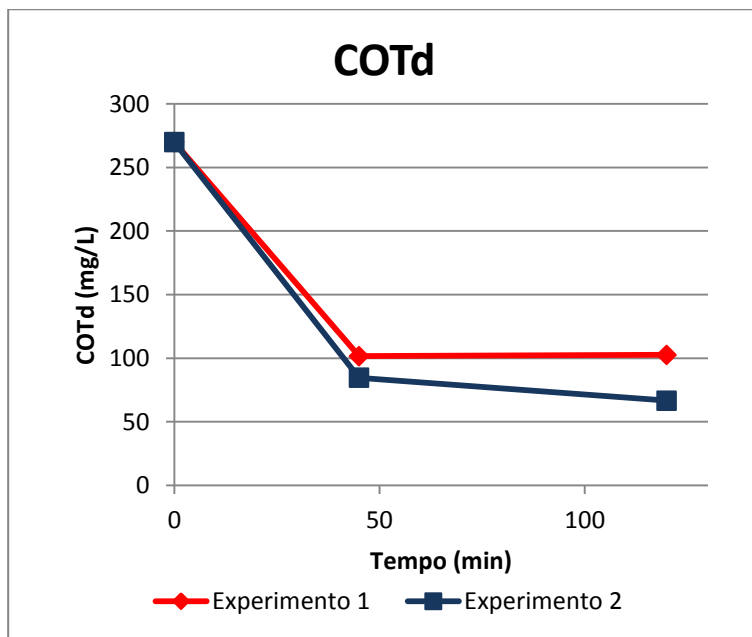


Figura 8. Valores da medida do parâmetro COTd.

Nos experimentos 1 e 2 realizados a remoção de COTd foi de 62% e 75%, respectivamente.

De acordo com Villa, Silva e Nogueira (2007) o modo de adição de H_2O_2 tem forte influência na eficiência de remoção de COTd. Em experimento realizado pelos autores citados, quando a quantidade de peróxido foi adicionada em duas doses (inicial e após 1 h), a remoção de COTd foi superior a 58%, já quando a quantidade de peróxido foi adicionada de uma só vez no início do experimento praticamente não houve remoção de COTd.

5.5 pH

Os valores de pH do efluente final dos experimentos 1 e 2 estão representados na Figura 9.

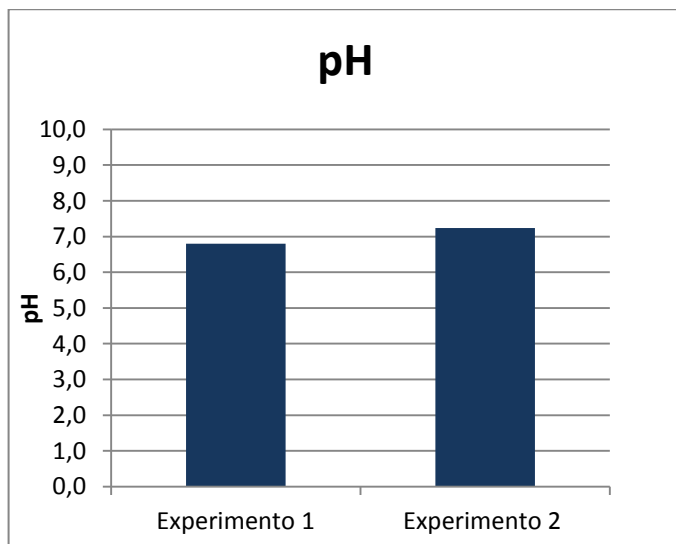


Figura 9. pH do efluente final dos experimentos 1 e 2.

O pH do efluente têxtil utilizado nos experimentos era de 8,2 e antes do início dos experimentos esse pH foi corrigido para o valor 6, como definido nos ensaios preliminares de otimização. Ao final dos experimentos obteve-se valores de pH iguais a 6,8 para o experimento 1 e 7,2 para o experimento 2.

O aumento do pH está ligado ao fato de que a matéria orgânica está sendo oxidada e essa reação pode estar liberando uma quantidade de íons no meio reacional, aumentando o valor do pH.

5.6 Ferro Total e Ferro Ferroso

A Tabela 9 apresenta as concentrações de ferro total e ferroso encontradas nas amostras do efluente final dos experimentos 1 e 2.

Tabela 9. Concentrações de ferro total e ferroso nas amostras do efluente final dos experimentos 1 e 2.

Concentrações de Ferro Total e de Ferro Ferroso		
Experimento	Ferro total (mg/L)	Ferro ferroso (mg/L)
1	0,200	0,041
2	0,230	0,026

Mesmo com a adição de uma quantidade de ferro no início dos experimentos percebe-se que permaneceu uma pequena quantidade de ferro dissolvido no meio reacional, isto indica que o ferro residual ficou no lodo gerado e, este pode ser reutilizado no processo Foto-Fenton.

5.7 Alcalinidade

Os resultados da análise da alcalinidade do efluente final do experimento 1 e 2 foram 117 mgCaCO₃/L e 212 mgCaCO₃/L, respectivamente.

5.8 Sólidos Totais, Sólidos em Suspensão Totais e Sólidos Dissolvidos Totais

A Figura 10 apresenta os valores referentes às análises dos Sólidos Totais (ST), Sólidos em Suspensão Totais (SST) e Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) para o efluente têxtil e para o efluente final dos experimentos 1 e 2.

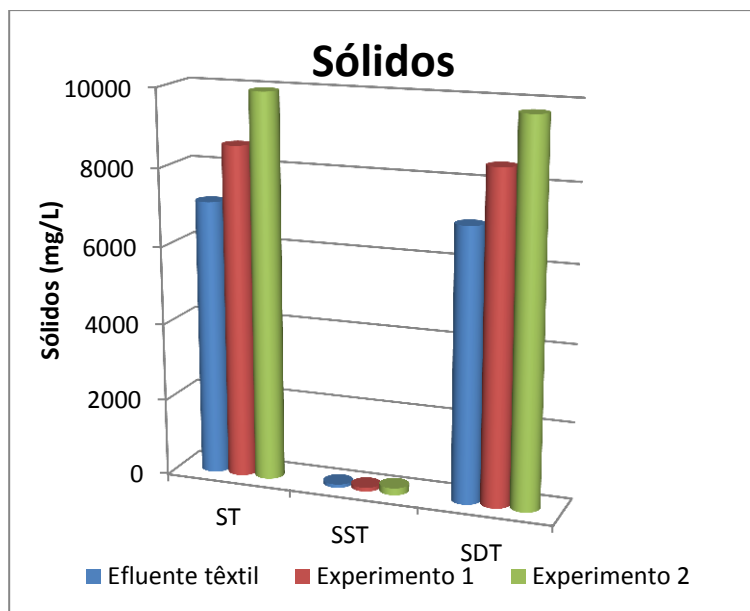


Figura 10. Resultados das análises de ST, SST e SDT para o efluente têxtil e para o efluente final dos experimentos 1 e 2.

De acordo com os resultados apresentados houve um aumento na concentração do valor dos ST, SST e SDT.

O aumento da concentração da série de sólidos também foi documentado por Silva e Barcelos (2014) ao aplicarem o sistema Foto-Fenton no lixiviado de aterro controlado e, segundo os autores, pode ter ocorrido em função do processo de mineralização que as amostras foram expostas, convertendo compostos em sais, o que propicia o aumento da concentração de sólidos. A possibilidade de ocorrer um aumento na concentração da série de sólidos está diretamente ligada com a possível geração de lodo, caracterizando uma desvantagem do processo.

Dentre os parâmetros analisados, o pH se encontra entre 6 e 9 faixa de valores determinada pelo Código Estadual do Meio Ambiente, Lei nº 14.675/2009, para que seja possível o lançamento de efluentes em corpos de água.

De acordo com a Resolução CONAMA 430/2011 o lançamento de efluentes em corpos d'água não poderá conferir ao corpo receptor características de qualidade em desacordo do seu enquadramento. Sendo assim, para efeito de comparação, observa-se que a região de origem do mesmo, município de Brusque, localiza-se as margens do Rio Itajaí-Mirim, enquadrado como curso d'água pertencente à classe 2 de acordo com a Portaria Nº 24, de 19/09/1979 que enquadra os cursos d'água do Estado de Santa Catarina.

Conforme a Resolução CONAMA 357/2005 para corpos d'água pertencente à classe 2, tem-se os seguintes valores dos parâmetros analisados: sólidos dissolvidos totais 500 mg/L; ferro dissolvido 0,3 mg/L Fe. Nos dois experimentos realizados o valor de sólidos dissolvidos totais ultrapassou o valor máximo estabelecido para corpos receptores pertencentes a classe 2, já os valores da análise do ferro dissolvido se encontram abaixo do valor máximo permitido.

Pela Resolução CONAMA 430/2011 as condições exigidas para o lançamento de efluente, de acordo com os parâmetros analisados são: pH entre 5 e 9; ferro dissolvido 15,0 mg/L Fe. A análise para verificar a possibilidade de lançamento do efluente deve observar o atendimento do valor máximo permitido para cada parâmetro no ponto de mistura neste trabalho foi feita uma comparação dos valores dos parâmetros analisados com os valores máximos permitidos pela legislação.

Na Tabela 10 está apresentada uma comparação entre os valores dos parâmetros requeridos para a realização do reúso do efluente nos processos de produção têxtil e os valores dos parâmetros do efluente

final dos experimentos realizados. Os valores dos parâmetros foram apresentados por Nemerow e Dasgupta (1991) *apud* Fiesp (2004).

Tabela 10. Comparação entre os valores dos parâmetros requeridos para a realização do reúso do efluente nos processos de produção têxtil e os valores dos parâmetros do efluente final dos experimentos realizados.

Processo	Ferro (mg/L)	pH	SDT (mg/L)	Sólidos Suspensos (mg/L)
Engomagem	0,30	6,5 - 10,0	100	5
Lavagem	0,10	3,0 - 10,5	100	5
Branqueamento	0,10	2,0 - 10,5	100	5
Tingimento	0,10	3,5 - 10,0	100	5
Resultados dos experimentos 1 e 2				
Experimento 1	0,20	6,8	8476	100
Experimento 2	0,23	7,2	9762	182

Percebe-se que para o parâmetro ferro o efluente atende o limite estabelecido apenas pelo processo de engomagem, o pH ficou dentro do intervalo requerido por todos os processos de produção, já os valores de sólidos dissolvidos e suspensos não foram atendidos.

Para utilização em sistemas de resfriamento e geração de vapor Crook (1996) *apud* Fiesp (2004) trazem alguns padrões de qualidade recomendado para água a ser utilizada como mostra a Tabela 11.

Os valores de SDT e SST não atenderam nenhum dos parâmetros recomendados, o pH do experimento 1 não atendeu nenhum dos valores recomendados e o pH do experimento 2 atendeu os valores recomendados para resfriamento e geração de vapor em caldeiras de baixa pressão. Os valores do parâmetro alcalinidade foram atendidos para o processo de resfriamento e geração de vapor em caldeiras de baixa pressão.

Tabela 11. Padrão de qualidade recomendado para água de resfriamento e geração de vapor.

Parâmetro	Resfriamento	Geração de Vapor		
		Caldeira de Baixa Pressão (< 10 bar)	Caldeira de Média Pressão (10-50bar)	Caldeira de Alta Pressão (>50 bar)
SDT (mg/L)	500	700	500	200
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	350	350	100	40
pH	6,9 a 9,0	7,0 a 10,0	8,2 a 10,0	8,2 a 9,0
SST (mg/L)	100	10	5	0,5

Fonte: CROOK (1996) *apud* FIESP (2004).

Em relação à utilização das lâmpadas, pode-se dizer que a utilização da lâmpada policromática de média pressão com 125 W de potência no experimento 2 contribuiu para que os resultados apresentados pelo mesmo fossem superiores aos resultados do experimento 1, uma vez que as demais condições experimentais foram iguais para os dois experimentos.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusão

O experimento 1 apresentou 21% de remoção da cor e 62% de remoção de COTd. O experimento 2 apresentou 50% de remoção da cor e 75% de remoção de COTd. Os resultados indicam que no experimento 2 o processo de degradação foi mais eficiente e como consequência a remoção da cor e do carbono orgânico total dissolvido foi maior.

Ao analisar as possibilidades de reúso do efluente tratado no setor têxtil em processos de produção, resfriamento e geração de vapor, chega-se a conclusão que após o tratamento do efluente com o processo Foto-Fenton o mesmo ainda se mantém fora dos padrões exigidos pelo setor para que seja possível seu reúso.

O efluente resultante do experimento 1 e 2 pode ser reutilizado na modalidade de usos urbanos para fins não potáveis podendo ser utilizado na irrigação de parques e jardins da indústria ou públicos, reserva de proteção contra incêndios, descarga sanitária em banheiros públicos e em edifícios comerciais e industriais, lavagem de pisos e calçadas da instalação industrial entre outros.

Com a realização deste trabalho pode-se concluir que a alta concentração de sólidos no efluente a ser tratado influenciou diretamente na absorção da radiação UV e, como consequência, o processo Foto-Fenton não apresentou alta eficiência de tratamento.

6.2 Recomendações

- Realizar estudos do processo Foto-Fenton utilizando efluente proveniente do sistema lodos ativados completo, ou seja, realizar a coleta do efluente após o decantador.
- Realizar estudos que utilizem a luz solar como fonte de radiação UV, a fim de obter uma fonte alternativa mais econômica do que o uso de fonte luminosa artificial.
- Realizar estudos do processo Foto-Fenton combinado com outros processos de tratamento como lodos ativados, filtração, coagulação, adsorção, entre outros.
- Realizar um estudo econômico que contabilize a operação, manutenção do reator, compra dos reagentes e consumo de energia.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIT - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confeção. **Indústria Têxtil e de Confeção Brasileira: Cenários, Desafios, Perspectivas, Demandas.** Frente Parlamentar para o Desenvolvimento da Indústria Têxtil e de Confeção. Brasília. Junho de 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9800: Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário.** Rio de Janeiro, 1987.

ALMEIDA, A.A. **Tratamento de efluente de indústria têxtil utilizando processos químicos avançados via reações de Fenton modificadas.** 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo. 2013.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 18. ed. 1v. Washington, D.C.: APHA, c1992.

ARAÚJO, R.N. **Degradação do corante Azul Reativo 19 usando UV; H₂O₂; UV/H₂O₂; Fenton e Foto-Fenton. Aplicação em efluentes têxteis.** 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.

BASTIAN, E.Y.O.; ROCCO, J.L.S. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil.** Colaboração Eduardo San Martin [et al.]. São Paulo, CETESB, SINDITÊXTIL, 2009.

BAUTITZ, I.R. **Degradação de fármacos por processo foto-Fenton e ferro metálico.** 2010. 170 f. Tese (Doutorado em Química). Instituto de Química. Universidade Estadual Paulista. Araraquara. 2010.

BELTRAME, L.T.C. **Caracterização de efluente têxtil e proposta de tratamento.** 2000. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2000.

BELTRAME, L.T.C. **Sistemas microemulsionados aplicados à remoção da cor de efluentes têxteis**. 2006. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2006.

BRASIL, SANTA CATARINA, Lei nº 14.675 de 13 de abril de 2009. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências.

CAVALCANTE, R.P. **Avaliação da degradação do agente antineoplásico mitoxantrona por processos H_2O_2 /UV, Foto-Fenton e Foto-Fenton Solar**. 2012. 77 f. Dissertação (Mestrado em Química). Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande. 2012.

CARREIRA, M. F. **Sistemas de Tratamento de Efluentes Têxteis – análise comparativa entre as tecnologias usadas no Brasil e na península Ibérica**. 2006. 674 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.

CHO, M.; LEE Y.; CHUNG H.; YOON, J. **Inactivation of *Escherichia coli* by Photochemical Reaction of Ferrioxalate at Slightly Acidic and Near-Neutral pHs**. Applied and Environmental Microbiology, Vol. 70, No. 2, p. 1129–1134, Coréia do Sul, 2004.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 357: Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 430: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março

de 2005. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2011.

COSTA, A.C.R.; ROCHA, E.R.P. **Panorama da cadeia produtiva têxtil e de confecções e a questão da inovação.** Departamento de Bens e Consumo, Comércio e Serviços da Área Industrial do BNDES. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 29, p. 159-202, mar. 2009.

CUNICO, P.; MAGDALENA, C.P.; CARVALHO, T.E.M.; FUNGARO, D.A. **Adsorção de corante reativo Preto 5 em solução aquosa utilizando cinzas leves de carvão.** 2nd International Workshop Advances in Cleaner Production. Key elements for a sustainable world: energy, water and climate change. São Paulo. Brasil. 2009.

DANIEL, L.A. (Coordenador); **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável.** Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB. 1^a Ed., 139 p. São Carlos-SP, 2001.

DURIGAN, M.A.B.; VAZ, S.R.; PERALTA-ZAMORA, P. **Degradação de poluentes emergentes por processos Fenton e Foto-Fenton.** Química Nova, São Paulo, vol.35, No. 7, p. 1381-1387, 2012.

FERREIRA, D.D.M.; SPANHOL, G.K.; KELLER, J. **Gestão do processo têxtil-contribuições a sustentabilidade dos recursos hídricos.** In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão; Gestão do conhecimento para a sustentabilidade, n° 5, Niterói-RJ, Anais... Niterói, RJ: [s.n.], 2009.

FIESC - Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina. **Santa Catarina em Dados 2011.** Diretoria de Relações Industriais e Institucionais. Unidade de Política Econômica. v.21. p.1-156. Florianópolis, 2011.

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Conservação e Reúso de Água: Manual de Orientações para o Setor Industrial.** v.1. 2004. Disponível em: <www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/conservacao-e-reuso-da-agua-2004/>. Acesso em: 18 setembro de 2014.

FREIRE, F.B.; FREITAS, S.I. **Avaliação da remoção de cor de um efluente têxtil sintético.** Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 7, n. 3, p. 241-249. 2010.

FREIRE, L.F.A. **Estudo do sistema Fenton-solar aplicado a remoção de fenol.** 2012. 79 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Escola de Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.

GUARATINI, C.C.I.; ZANONI, M.V.B. **Corantes têxteis.** Química Nova, São Paulo, vol.23, No. 1, p. 71-78, 2000.

HASSEMER, M.E.N. **Tratamento de efluente têxtil – processo físico-químico com ozônio e floculação em meio granular.** 2000. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2000.

HASSEMER, M.E.N. **Oxidação fotoquímica – UV/H₂O₂ – para degradação de poluentes em efluentes da indústria têxtil.** 2006. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.

HOPPER, D.P. **Tratamento de efluentes de indústrias têxteis utilizando processos oxidativos avançados.** 2007. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2007.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; MORAES, S.G.; DURÁN, N. **Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis.** Química Nova, São Paulo, vol.25, No. 1, p. 78-82, 2002.

LANGE, L.C.; ALVES, J.F.; AMARAL, M.C.S.; JÚNIOR, W.R.M. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processo oxidativo avançado empregando reagente de fenton.** Artigo Técnico apresentado a Revista Eng. Sanit. Ambient, v.11, n.2, p. 175-183, abr/jun 2006.

LAPERTOT, M.; PULGARÍN, C.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P.; MALDONDO, M.I.; PÉREZ-ESTRADA, L.; OLLER, I.; GERNJAK, W.; MALATO, S. **Enhancing biodegradability of priority substances (pesticides) by solar photo-fenton**. Water Research. V. 40, p. 1086-1094. 2006.

LUSTOSA, G.M.M.M.; NETO, J.M.M.; SILVA, C. E. **Degradação de Efluente Têxtil pela Reação de Fenton**. Revista Virtual de Química-RVQ, v. 5, nº 5, p. 973-980, outubro-2013.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reúso de água**. Barueri: Manole. xvii, 579p. 2003.

MANENTI, D.R.; GOMES, L.F.S.; BORBA, F.H.; MÓDENES, A.N.; ESPINOZA-QUINONES, F.R.; PALÁCIO, S.M. **Otimização do processo foto-Fenton utilizando irradiação artificial na degradação do efluente têxtil sintético**. Revista da Escola de Engenharia da UFF - ENGEVISTA, v.12, n.1, p. 22-32, junho 2010. Disponível em: <<http://www.uff.br/engevista/seer/index.php/engevista/article/download/241/143>>. Acesso em: 3 setembro 2014.

MARTINS, L.M. **Estudo da aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluente têxteis visando o seu reúso**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal do Piauí. Teresina. 2011.

MARTINS, L.M.; SILVA, C.E.; NETO, J.M.M.; LIMA, A.S.; MOREIRA, R.F.P.M. **Aplicação de Fenton, foto-Fenton e UV/H₂O₂ no tratamento de efluente têxtil sintético contendo o corante Preto Biozol UC**. Artigo Técnico apresentado a revista Eng Sanit Ambient, v.16, n.3, p. 261-270, jul/set 2011.

MELO, A.R. **Uso integrado e eficiente da água nas indústrias têxteis catarinenses**. 2008. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2008.

MELO, S.A.S. **Influência da matriz na degradação do fármaco bezafibrato por processo foto-Fenton**. 2007. 75 f. Dissertação

(Mestrado em Química). Instituto de Química. Universidade Estadual Paulista. Araraquara. 2007.

MEZA, C.M.M. **Produção mais Limpa e otimização do tratamento de efluentes líquidos de estamparias em Brusque e Guabiruba**. 2010. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2010.

NOGUEIRA, R.F.P.; MODÉ, D.F. **Fotodegradação de fenol e clorofenóis por processo foto-Fenton mediado por ferrioxalato**. Eclética Química, vol. 27, núm. 1especial, p. 169-185, São Paulo, 2002.

NOGUEIRA, R.F.P.; TROVÓ, A.G.; SILVA, M.R.A.; VILLA, R.D.; OLIVEIRA, M.C. **Fundamentos e aplicações ambientais dos processos Fenton e Foto-Fenton**. Química Nova, São Paulo, vol.30, No. 2, p. 400-408, 2007.

NUNES, J.A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 6ª Edição. Gráfica Editora J. Andrade. Aracaju-Sergipe. 2012.

OLIVEIRA, E.H.P. **Preparação de membranas microporosas para tratamento de efluentes da indústria de alimentos**. 2000. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2000.

OLIVEIRA, M.C.; NOGUEIRA, R.F.P.; NETO, J.A.G.; JARDIM, W.F.; ROHWEDDER, J.J.R. **Sistema de injeção em fluxo espectrofotométrico para monitorar peróxido de hidrogênio em processo de fotodegradação por reação Foto-Fenton**. Química Nova, São Paulo, vol.24, No. 2, p. 188-190, 2001.

QUADROS, S.S. **Tratamento e reutilização de efluentes têxteis gerados nos tingimentos de tecidos de algodão**. 2005. 110 f. Dissertação (Mestrado em Química). Curso de Mestrado em Química, Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau. 2005.

RESENDE, L. P. **Reúso na indústria têxtil e lavanderias**. Revista virtual Hydro, Ano VI, nº 66, p. 14-19, Abril-2012. Disponível em: <http://www.arandanet.com.br/midiaonline/hydro/2012/abril/index.html>. Acesso em: 22 setembro 2014.

SAFARZADEH-AMIRI, A.; BOLTON, J. R.; CATER, S. R. **Ferrioxalate-mediated solar degradation of organic contaminants in water**. Solar Energy, v.56, No. 5, p.439-443, 1996. Disponível em :< http://www.researchgate.net/publication/223401265_Ferrioxalate-mediated_photodegradation_of_organic_pollutants_in_contaminated_water>. Acesso em: 22 setembro 2014.

SALGADO, B.C.B.; NOGUEIRA, M.I.C.; RODRIGUES, K.A.; SAMPAIO, G.M.M.S.; BUARQUE, H.L.B.; ARAÚJO, R.S. **Descoloração de efluentes aquosos sintéticos e têxtil contendo corantes índigo e azo via processos Fenton e foto-assistidos (UV e UV/H₂O₂)**. Artigo Técnico apresentado a revista Eng Sanit Ambient, v.14, n.1, p. 1-8, jan/mar 2009.

SAMET, Y.; HMANI, E.; ABDELHÉDI, R. **Fenton and solar photo-Fenton processes for the removal of chlorpyrifos insecticide in wastewater**. Water SA. Vol. 38. No. 4. July, 2012. Disponível em :< <http://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/81031>>. Acesso em: 2 outubro 2014.

SANTA CATARINA. PORTARIA SEPLANCG Nº 24, de 19/09/1979. Enquadra os cursos d'água do Estado de Santa Catarina, na classificação estabelecida pela Portaria GM nº 0013, de 15.01.76, do Ministério do Interior. Florianópolis. 19 de setembro de 1977.

SILVA, M.R.A. **Influência de complexantes de ferro na degradação de compostos orgânicos por processo Foto-Fenton/Solar**. 2007. 191 f. Tese (Doutorado em Química). Instituto de Química. Universidade Estadual Paulista. Araraquara. 2007.

SILVA, R.B.; BARCELOS, B.R. **Avaliação da degradação de lixiviado do aterro controlado Jockey Club de Brasília-DF aplicando processos oxidativos avançados (POA's) em sistema Fento-Fenton**. In: XI Seminário Nacional de Resíduos Sólidos, Fiocruz Brasília, 2014.

SOUZA, K.V. **Desenvolvimento de espécies de ferro imobilizadas em matrizes poliméricas e sua utilização na remediação de resíduos industriais.** 2009. 167 f. Tese (Doutorado em Química Orgânica). Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2009.

TEIXEIRA, B.A.P.C.; JARDIM, F.W. **Caderno Temático. Processos oxidativos avançados: Conceitos teóricos.** Universidade Estadual de Campinas, Campinas, vol. 03, p.485, 2004.

TWARDOKUS, R.G. **Reúso de água no processo de tingimento da indústria têxtil.** 2004. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.

VELÁSQUEZ, M.; SANTANDER, I. P.; CONTRERAS, D.R.; YÁÑEZ, J.; ZAROR, C.; SALAZAR, R.A.; PÉREZ-MOYA, M.; MANSILLA, H.D. **Oxidative degradation of sulfathiazole by Fenton and photo-Fenton reactions.** Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 49:6, 661-670, 2014. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10934529.2014.865447#.VFrK7_nF-H4>. Acesso em: 18 outubro 2014.

VILLA, R.D.; SILVA, M.R.A.; NOGUEIRA, R.F.P. **Potencial de aplicação do processo foto-Fenton/solar como pré-tratamento de efluente da indústria de laticínios.** Química Nova, São Paulo, vol.30, No. 8, p. 1799-1803, 2007.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Vol.4. Lodos ativados. 2 ed. Editora UFMG. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. 416p. Belo Horizonte. 2002.

ZANELLA, Z.; SCHARF, M.; VIEIRA, G.A.; PERALTA-ZAMORA, P. **Tratamento de banhos de tingimento têxtil por processos foto-Fenton e avaliação da potencialidade de reúso.** Química Nova, São Paulo, vol.33, No. 5, p. 1039-1043, 2010.

ZANONI, M.V.B.; CARNEIRO, P.A. **O descarte dos corantes têxteis.**
Ciência Hoje. v.29, n. 174, p. 61-64, 2001.

APÊNDICE 1

Curva de calibração para determinação de peróxido de hidrogênio residual

